



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO COMPARATIVO DIMENSIONAL E ANÁLISE
TEÓRICA DO COMPORTAMENTO ELÁSTICO DE
PÁS COMPÓSITAS**

WILLIAN ARVEY MOLANO GABALÁN

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO COMPARATIVO DIMENSIONAL E ANÁLISE
TEÓRICA DO COMPORTAMENTO ELÁSTICO DE PÁS
COMPÓSITAS**

WILLIAN ARVEY MOLANO GABALÁN

ORIENTADOR: FLAMINIO LEVY NETO

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO: ENM.DM – 83 A/14

BRASÍLIA/ DF: AGOSTO - 2014

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO COMPARATIVO DIMENSIONAL E ANÁLISE
TEÓRICA DO COMPORTAMENTO ELÁSTICO DE PÁS
COMPÓSITAS**

WILLIAN ARVEY MOLANO GABALÁN

ORIENTADOR: FLAMINIO LEVY NETO

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

BRASÍLIA/ DF: AGOSTO - 2014

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO COMPARATIVO DIMENSIONAL E ANÁLISE
TEÓRICA DO COMPORTAMENTO ELÁSTICO DE PÁS
COMPÓSITAS**

WILLIAN ARVEY MOLANO GABALÁN

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM SISTEMAS
MECATRÔNICOS.**

APROVADA POR:

**Prof. Flaminio Levy Neto, PhD
(orientador)**

**Prof. Antonio Pirateli Filho, PhD (UnB - PPMEC)
(Examinador Interno)**

**Prof. Alberto Carlos Guimarães Castro Diniz, PhD (UnB - PCMEC)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 22 DE AGOSTO DE 2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília. Acervo 1017812.

M717e Molano Gabalán, Willian Arvey.
Estudo comparativo dimensional e análise teórica do comportamento elástico de pás compósitas / Willian Arvey Molano Gabalán. -- 2014.
xii, 143 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 2014.

Inclui bibliografia.

Orientação: Flaminio Levy Neto.

1. Hélices. 2. Força eólica. 3. Elasticidade - Testes. 4. Fibras de vidro. 5. Fibras de carbono. I. Levy Neto, Flaminio. II. Título.

CDU 620.1

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA:

MOLANO, Willian A. (2014). Estudo Comparativo Dimensional E Análise Teórica do Comportamento Elástico De Pás Compósitas.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Willian Arvey Molano Gabalán.

TÍTULO: Estudo Comparativo Dimensional E Análise Teórica do Comportamento Elástico De Pás Compósitas.

GRAU: Mestre

ANO: 2014

É concebida á Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Willian Arvey Molano Gabalán

Dedicação

À minha mãe, Maria Elena, e irmãos, Jonny, Carlos, Alejandro, por o tempo escasso que pudemos compartilhar, o fizeram mais valioso.

Ao meu pai, William, por seus ensinamentos e carinho que me deu enquanto estive neste mundo, suas lembranças sempre estarão comigo.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida.

A Tarsis pela colaboração e paciência que mostrou, durante as medições.

Ao Prof. Dr. Antonio Pirateli Filho, pela dedicação nas correções e orientações neste período de aprendizado.

Ao Prof. Flaminio Levy Neto pelo apoio, correções e guia durante esta pesquisa.

Aos meus colegas de pós-graduação que sempre transformaram os tempos difíceis em agradáveis.

À universidade de Brasília, Faculdade de Tecnológica, aos professores do Programa de Pós-graduação em sistemas Mecatrônicos.

À CAPES pelo apoio econômico.

Willian Arvey Molano Gabalán

“A leitura após certa idade distrai excessivamente o espírito humano das suas reflexões criadoras. Todo o homem que lê demais e usa o cérebro de menos adquire a preguiça de pensar.”

Albert Einstein

RESUMO

ESTUDO COMPARATIVO DIMENSIONAL E ANÁLISE TEÓRICA DO COMPORTAMENTO ELÁSTICO DE PÁS COMPÓSITAS

Autor: Willian Arvey Molano Gabalán

Orientador: Flaminio Levy Neto

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos

Brasília, Agosto de 2014

Este trabalho avalia a fabricação, a geometria e o acabamento superficial de dois grupos de três pás compósitas cada um, feitas utilizando-se cura frio de resina epóxi e reforçadas com tecidos balanceados. O primeiro grupo de pás, PC, em fibra de carbono e, o grupo dois, PV, em fibra de vidro-E. Além disso, foi usado para fins de comparação o molde macho denominado pá precursora, PP.

Foram construídos modelos de projeto auxiliado por computador, CAD, de todas as pás a partir de pontos obtidos com uma máquina de medir por coordenadas. Com ditos modelos se fez a avaliação comparando-os com o modelo teórico padrão, GT. Como resultados da análise se obtiveram valores médios de $2,23^{\circ}$; $2,48^{\circ}$; $0,38^{\circ}$ nos desvios em graus do eixo central com respeito ao modelo CAD, para os modelos das pás compósitas PC, PV e PP, respectivamente. Assim como uma distância média dos pontos ao modelo teórico de 1,07 mm; 1,01 mm; 0,64 mm, dos modelos das pás compósitas PC, PV e PP, respectivamente. Isto é importante porque permitiu desenvolver uma metodologia válida para avaliar pás com respeito a um modelo teórico ou um molde experimental

Foi obtido como resultado principal que os dados da rugosidade dos parâmetros Ra, Rq, têm como valores médios maiores nas pás com reforço de fibra de vidro, PVs (Ra=2,64 μm ; Rq=3,65 μm ; Rz=14,46 μm), quando comparados com as pás com reforço em fibra de carbono, PCs (Ra=0,42 μm ; Rq=0,75 μm ; Rz=1,62 μm). Assim, foi possível fazer uma avaliação entre os dois tipos de tecidos usados na fabricação de pás.

Além, foram estimados os valores para os módulos elásticos para as pás por dois métodos diferentes, o primeiro usando simulações (S) e o segundo usando aproximação da geometria das pás (AG) que permite fazer uma estimativa rápida, sem levar em conta toda a complexidade geométrica das pás. Para o grupo de pás PVs obtendo-se por médio de 'AG' 13,7 GPa e 'S' 14,4 GPa, entretanto para as PCs obteve-se 22,2 GPa para 'S' e 30,5 GPa por 'S' respectivamente.

Palavras-chave: Hélices, força eólica, elasticidade – testes, fibras de vidro, fibras de carbono.

ABSTRACT

DIMENSIONAL COMPARATIVE STUDY AND ANALYSIS OF THE ELASTIC BEHAVIOR OF COMPOSITE BLADES

In this work, the process, geometry and surface finish of six composite blades for use in wind generators were studied. These blades, divided in two groups; PC (carbon fiber) and PV (E-glass fiber) were fabricated from the same precursor blade (PP) using manual impregnation and cold curing epoxy resin matrix reinforced with balanced fabrics.

Computer aided design (CAD) models were constructed for all the blades from data (coordinates) obtained with a Articulated Arm coordinate Measuring Machine (AACMM). These models were compared with the theoretical standard CAD model (GT). The result of this analysis indicate a deviation of 2.23° ; 2.48° ; 0.38° (in relation to the central axis and with respect to the standard CAD model), for models of composite blades PC, PP and PV, respectively, just as an average distance of points to the theoretical model of 1.07 mm; 1.01 mm; 0.64 mm, of the models PC, PP and PV, respectively. This is important because it has allowed to developing a valid methodology to assess blades with respect to a theoretical model or an experimental mold.

Was obtained, as the main result, that data of the roughness parameters Ra, Rq, and Rz, showed higher mean values in spades reinforced with fiberglass, PVs (Ra=2,64 μm ; Rq=3,65 μm ; Rz=14,46 μm), than blades reinforced with carbon fiber, PCs (Ra=0,42 μm ; Rq=0,75 μm ; Rz=1,62 μm). Thus, it was possible to evaluate between two types of tissues when used in the manufacture of blades.

Additionally, were estimated the values for the bending elastic modulus of the blades by two different methods. The first using numerical simulations (S) and the second approach using the geometry of the blades (AG). For the group of PVs (PCs) was obtained 13,7 GPa (22,2 GPa) and 14,4 GPa (30,5 GPa) using the methodology “AC” and “S”, respectively.

Key words: wind power, elasticity – tests, glass fibers, carbon fibers.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2.1	Objetivo geral	4
1.2.2	Objetivos específicos	4
1.3	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	5
1.4	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	5
2	REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS	7
2.1.1	Definição	7
2.1.2	Compósitos reforçados com fibras	8
2.1.3	Fibra de vidro	9
2.1.4	Fibra de carbono	9
2.1.5	Micromecânica clássica para compósitos de matriz polimérica	10
2.1.6	Método das áreas para uma viga engastada	12
2.2	RUGOSIDADE	15
2.2.1	Desvio médio aritmético do perfil, R_a	16
2.2.2	Rugosidade quadrática média, R_q	16
2.2.3	Rugosidade média, R_z	17
2.2.4	Rugosímetro	17
2.3	CONCEITOS ESTATÍSTICOS	19
2.3.1	Média e desvio padrão de médias	19
2.3.2	Media geométrica e função log-normal	20
2.3.3	Teste de normalidade	21
2.3.4	Dados em intervalos não igualmente distribuídos	22
2.3.5	Transformação de dados	26

2.3.6	Incerteza	26
2.4	PÁS EÓLICAS	29
2.4.1	Perfis aerodinâmicos	29
2.4.2	Geometria da pá	29
2.5	MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO DE PEÇAS	31
2.5.1	Máquinas de medição por coordenadas, medição por contato	31
2.5.2	Medições em ambientes controlados	35
3	METODOLOGIA	36
3.1	DESCRIÇÃO DAS PÁS COMPÓSITAS	42
3.2	DESCRIÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO USADOS	44
3.2.1	Curvas e superfícies <i>NURBS</i>	44
3.2.2	Rugosímetro SJ-201	45
3.2.3	Braço Articulado “Arm 100” da Romer	46
3.2.4	Calibrador traçador de altura	48
3.3	PREPARAÇÃO DAS PEÇAS PARA A MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE DA GEOMETRIA	49
3.3.1	Limpeza e fixação das pás	49
3.3.2	Controle de temperatura	49
3.4	ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO E MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE	51
3.4.1	Comprimento de amostragem (“ <i>Cut-off</i> ”) adequado	51
3.4.2	Apresentação dos parâmetros R_a , R_q e R_z da rugosidade	53
3.4.3	Métodos usados para analisar a rugosidade, médias e desvios padrões, teste de normalidade	55
3.4.4	Transformação dos dados da rugosidade, filtrado passa baixas, diferenciação estável	55
3.5	ESTRATÉGIA E MEDIÇÃO DA GEOMETRIA	57
3.6	CONSTRUÇÃO DOS MODELOS CAD	59

3.6.1	Método para comparação dos modelos das pás compósitas com o modelo <i>GT</i> das pás	63
3.6.2	Método para comparar os perfis de cada modelo das pás compósitas com os do modelo <i>GT</i>	65
3.7	DETERMINAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO MÓDULO DE ELASTICIDADE (E) DAS PÁS COMPÓSITAS	69
3.7.1	Preparação das pás para a medição das deflexões	71
3.7.2	Medição das deflexões verticais e cálculo do módulo elástico	73
3.7.3	Modelo estático para aplicar o método dos momentos de áreas, método 1	74
3.7.4	Medição das deflexões e cálculo do módulo elástico, Método 2	78
4	RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES	80
4.1	RESULTADOS SOBRE A RUGOSIDADE	80
4.1.1	Comprimento de amostragem (“ <i>cut-off</i> ”) adequado	80
4.1.2	Histogramas de R_a , R_q , e R_z por quadrantes e regiões	86
4.2	RESULTADOS DA ANÁLISE DA GEOMETRIA DAS PÁS	96
4.2.1	Modelagem das superfícies das pás compósitas	96
4.2.2	Comparação dos modelos das pás compósitas com o modelo <i>GT</i>	98
4.2.3	Comparação dos perfis de cada modelo das pás compósitas com os perfis do modelo <i>GT</i>	100
4.3	ESTIMATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EFETIVO DE PÁS COMPÓSITAS USANDO VALORES DE DEFLEXÃO EXPERIMENTAL POR MEIO DE SIMULAÇÕES EM ANSYS 14.5 E EQUAÇÕES MATEMÁTICAS	103
4.3.1	Resultados das deflexões medidas experimentalmente	103
4.3.2	Modelo estático para aplicar o método dos momentos de áreas, método 1	112
4.3.3	Estimativa do módulo elástico mediante simulações em <i>ANSYS</i> ,	

método 2	115
CONCLUSÕES	117
REFERÊNCIAS	121
A. APÊNDICES	124
A.1 RUGOSIDADE	124
A.2 RUGOSIDADE; TRANSFORMAÇÃO DOS DADOS Ra, Rq, E Rz	129
A.3 DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE PONTOS PARA A RECONSTRUÇÃO DE SUPERFÍCIE DAS PÁS COMPÓSITAS COM RHINOCEROS 5.0	135
A.4 PADRONIZAR A METODÓLOGIA PARA A ANÁLISE EM RHINO- CEROS 5.0	138
A.5 DADOS DAS DEFLEXÕES NAS PÁS USANDO DIFERENTES MASSAS	141

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O atual cenário energético global é bastante amplo, com respeito às formas de gerar energia. Segundo Bernat (2011), além do esgotamento próximo das reservas de petróleo, dentre as principais causas da busca por novas tecnologias renováveis estão o aquecimento global e a poluição causada pela emissão intensa de gases prejudiciais às vidas humana, animal e vegetal . Esses gases são emitidos na queima de combustíveis fósseis surgidos do petróleo.

O petróleo ainda tem, de fato, domínio sobre outras fontes energéticas mais limpas, devido ao seu uso extenso ao longo das últimas décadas. Bernat (2011) afirma que há, também, razões econômicas para o domínio do petróleo, além do fato de que a tecnologia atual é dependente dele, esses fatores fazem com que uma substituição desse recurso seja difícil e lenta.

Como a sociedade mundial demanda cada vez mais energia, segundo Zerbitzu (2008) esse fato tem feito com que as reservas de petróleo atuais estejam acabando e que cada vez seja mais difícil encontrar novos reservatórios, por isso no mundo se tem intensificado esforços por alternativas renováveis que possam diminuir o problema da falta deste combustível. Nas últimas duas décadas, segundo Amaral (2011), o Brasil tem voltado o interesse na produção de energia eólica, devido às vantagens que esse tipo de energia renovável proporciona, como, por exemplo, ser uma produção limpa, ou seja, que não polui o meio ambiente.

Na região Nordeste, a produção de energia eólica é bastante significativa, pois os ventos são propícios nas grandes temporadas de secas que esta região passa. De acordo com Amaral (2011), nessas temporadas se tem uma queda na produção de energia hidrelétrica e, isso, faz com que o país precise de outros tipos de energia. Em particular da energia eólica, que é complementar à hidroelétrica. Nesse sentido, o desenvolvimento desse tipo de

energia é de extrema importância para o Brasil, além de que o país conta com um grande potencial para essa produção.

Como foi mencionado, o desenvolvimento de energias renováveis é bastante relevante. Abdelli (2007) menciona que os estudos e novas metodologias que visam melhorar a eficiência na produção de energia eólica como avanços na tecnologia de materiais, metrologia, análise dos ventos, mecanismos de controle, e a inserção de energia renovável na matriz elétrica, estão sendo cada vez mais importantes.

Amaral (2011) assevera que, a capacidade de produzir energia eólica depende de múltiplos fatores como: vento disponível e sua velocidade; quantidade de pás do aerogerador; massa e acabamento (p.ex. polido) das pás; materiais das pás; torre usada e sua altura; gerador usado; e eletrônica de alta confiabilidade, dentre outros. Além deste fatores, há outros expostos por Van Rooj (2011) como a rugosidade superficial nas pás, tipo de perfil usado, geometria das pás, não menos importantes. Todos esses fatores, podem contribuir para que a obtenção de energia seja a máxima possível.

Desse modo, uma avaliação do comportamento elástico e dos fatores mencionados por Van Rooj (2011), em pás fabricadas em materiais compósitos, é a razão principal deste trabalho, intitulado “ESTUDO COMPARATIVO E ANÁLISE TEÓRICA DO COMPORTAMENTO ELÁSTICO DE PÁS COMPÓSITAS”.

Nesta pesquisa, foi trabalhado principalmente com sete pás fabricadas nos projetos de graduação no ENM/UnB de: (i) Sousa e Oliveira (2010), e (ii) Pinheiro e Martins (2011). Destas sete pás, quatro foram feitas em epóxi com reforço em tecido de fibra de vidro, e três pás feitas em epóxi com reforço em tecido de fibra de carbono, denominadas, respectivamente, PV e PC. Dentre às quatro pás descritas acima, uma delas, foi a precursora das outras seis, a qual denominamos “pá precursora” (PP). A pá precursora, na verdade um molde macho utilizado em uma das etapas do desenvolvimento das demais pás, tem um acabamento superficial diferenciado obtido pela adição de “gel coat” (pó de óxido de titânio) na resina epóxi.

Fazer a avaliação desses fatores para pás compósitas constitui-se em um desafio, entre outras coisas, pela dificuldade que implica a decisão de saber quais parâmetros medir e o

método mais viável para tal fim. Em se tratando do referente a conformados geométricos complexos, como as pás compósitas, usa-se a engenharia reversa. Ordoñez (2012, p. 3) menciona que: “O projeto de uma peça nova é muitas vezes realizado com técnicas de engenharia reversa, feitas a partir da medição de um protótipo, do projeto assistido por computador (CAD) e da fabricação de moldes ou peças com auxiliado do computador (CAM)”.

A análise do comportamento mecânico para peças complexas, segundo Fish (2009), normalmente exige o uso de ferramentas computacionais baseadas no método dos elementos finitos, por exemplo o software comercial ANSYS, além de ferramentas complementares de desenho, como o SolidWorks, capazes de reproduzir a geometria com a precisão requerida.

Nesse sentido, fizeram-se três estudos independentes das pás, procurando complementaridade entre suas avaliações. O primeiro estudo é sobre a rugosidade e como o tipo de material e acabamento das pás pode influenciá-la; também, como ela varia dependendo das regiões nas quais se faz a avaliação. Para tanto, as superfícies superior e inferior das pás foram divididas em: (i) bordo de ataque (BA); (ii) plano médio (PM); e (iii) bordo de fuga (BF). O segundo estudo foi a reconstrução geométrica das superfícies de todas as pás para analisar as semelhanças e diferenças, com respeito a um modelo teórico (*GT*) e avaliar todas as pás PV, PC e PP, e assim concluir sobre o processo de fabricação. Por último foram feitas medições de deflexões nas pás e obtido os módulos de elasticidade para avaliar o comportamento mecânico, além de se fazer simulações numéricas do comportamento elástico das pás, para comparar com os resultados experimentais.

Para fazer as avaliações se teve em conta o processo de fabricação das pás seguido por Sousa e Oliveira (2010), o qual em resumo teve os seguintes passos: (i) criação de um modelo teórico digitalizado no SolidWorks 2007, de uma pá com os perfis da NACA 63-215; (ii) a partir desse modelo foram fabricados na empresa Tipo-D dois moldes fêmea de madeira, com as superfícies superior e inferior deste perfil; (iii) com os moldes fêmea foi fabricada uma pá precursora (PP), de fibra de vidro em matriz de resina epóxi, com adição de “gel coat” na superfície; (iv) essa PP foi usada como molde macho para a fabricação de mais um par de moldes fêmeas de vidro-E/epóxi, também com “gel coat” na superfície; e

(v) a partir deste últimos moldes fêmeas, foram feitas seis pás compósitas, na qual três são PC e três PV.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo geral

Analisar e obter conclusões sobre o modelo geométrico para encontrar uma faixa de variação da geometria entre os modelos encontrados e o modelo teórico e a rugosidade em pás compósitas que seguiram o mesmo processo de fabricação, reforçadas com fibras de carbono (PC) e vidro-E (PV). Além de estudar como o comportamento elástico estático das pás muda, ao variar os materiais da fabricação.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Identificar diferenças nos valores e no comportamento na distribuição dos parâmetros da rugosidade em pás compósitas de dois tipos: as pás fabricadas em epóxi com reforço de fibra de vidro (PV) e as pás produzidas com reforço em fibra de carbono (PC).
2. Analisar as populações com os descritores de rugosidade das diferentes pás e observar se tem ou não o mesmo comportamento nos parâmetros Ra, Rq e Rz.
3. Construir um modelo da superfície de cada uma das pás compósitas, a partir de pontos coletados.
4. Elaborar um método para comparar as pás com o modelo teórico CAD por meio do programa *Rhinoceros 5.0*.
5. Avaliar e analisar as diferenças entre os modelos das superfícies das pás compósitas e o modelo teórico.
6. Determinar os módulos elásticos em flexão das pás, experimentalmente, para analisar as diferenças entre elas.
7. Determinar um método para estabelecer os passos, que se deve ter em conta, ao fazer simulações do comportamento elástico das pás.

8. Avaliar o comportamento elástico das pás compósitas em flexão comparando os resultados experimentais e simulações (em ANSYS 15.4), dos grupos PV e PC.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O conformado e a rugosidade das pás eólicas determinam grande parte das propriedades e sua possibilidade de obter energia do vento. Um conformado adequado tem pequenos desvios em relação aos perfis transversais e ao eixo central da pá para o modelo teórico. Uma rugosidade reduzida indicara um bom acabamento da pá e um maior desempenho aerodinâmico, em função da diminuição do atrito com o ar.

A conformidade geométrica nas pás só é possível de demonstração e verificação, através da utilização de processos de medição adequados e sua comparação com o modelo padrão. Quando adequados, além de contribuir para a avaliação da conformidade geométrica das peças, permite conhecer e, por conseguinte, corrigir desvios e variações no comportamento dos processos de fabricação, como nos mostra Pfeifer (1999).

1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho esta organizado da seguinte forma: no capítulo 2, é apresentada uma revisão de literatura pertinente para a pesquisa, como assuntos relacionados como materiais compósitos, medição, pás eólicas, rugosidade, tratamento estatístico de dados não normais, modelagem CAD e elementos finitos, com o propósito de apresentar conceitos relevantes sobre os principais tópicos que foram abordados.

No capítulo 3, encontra-se a metodologia geral seguida nesta pesquisa. Para tanto, utiliza-se três métodos na obtenção de um resultado final, no qual espera-se: (i) obter os valores dos parâmetros Ra, Rq e Rz da rugosidade; (ii) coletar os pontos com a Máquina de Medir por Coordenadas do tipo braço articulado; e (iii) como obter deflexões nas pás, engastadas na base e com carga vertical na extremidade livre. Para, com esses parâmetros, fazer comparações entre as distintas pás, sobre a rugosidade, modelo conformado geométrico, comportamento mecânico, para finalmente fazer uma avaliação delas.

No capítulo 4, relatam-se e discutem-se os resultados obtidos na pesquisa, tanto os resultados referentes à rugosidade, como a comparação dos modelos CAD e a comparação dos resultados experimentais das deflexões com as simulações.

No capítulo 5, têm-se as conclusões; no final do trabalho, têm-se os apêndices, com dados e resultados importantes, que não fazem parte dos objetivos pelo que de fato não caberem no corpo do trabalho, mas que foram desenvolvidos por serem necessários na pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

2.1.1 Definição

Um compósito geralmente é a combinação de duas ou mais fases, normalmente a nível macroscópico: uma chamada de fase dispersa, e outra chamada de matriz, que aglomera a fase dispersa. As propriedades resultantes num compósito é função das propriedades das fases constituintes, da quantidade relativa de cada fase e da geometria da fase dispersa (Callister, 2007).

Uma maneira de classificar os compósitos é pela geometria da fase dispersa. Um esquema simples para a classificação dos materiais compósitos está mostrado, na Figura 2.1.

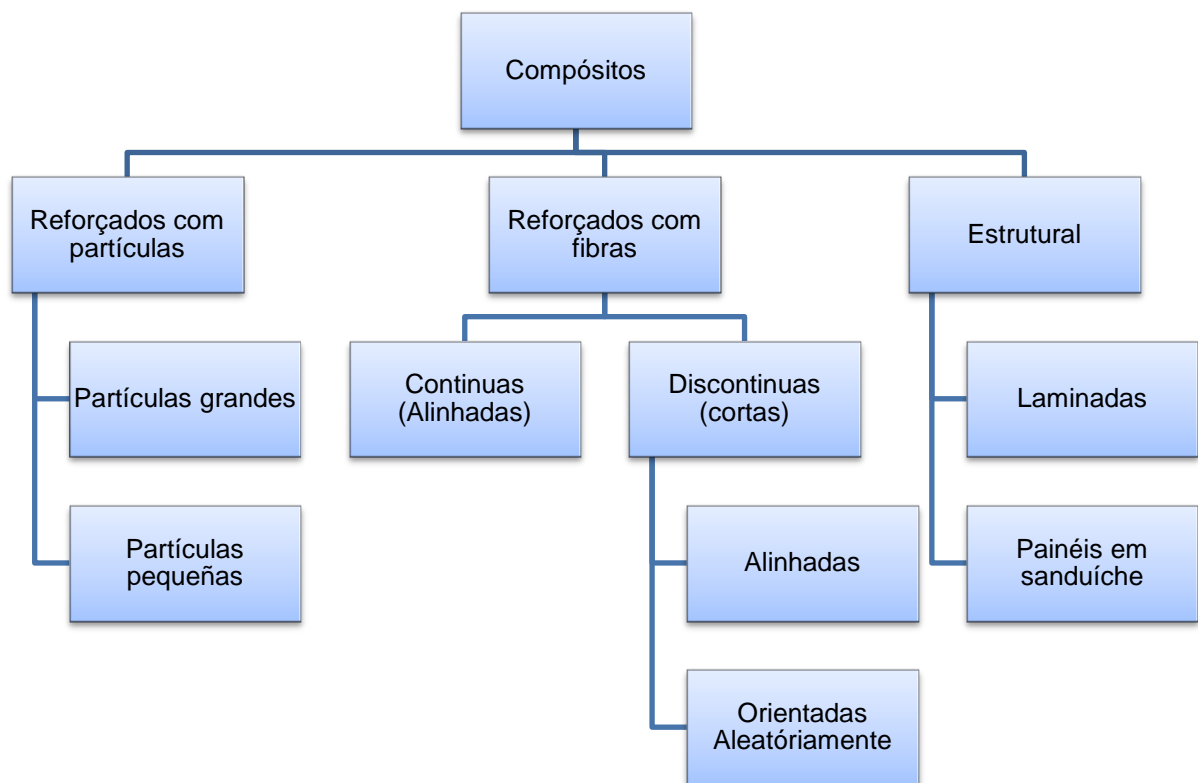


Figura 2.1- Classificação dos materiais compósitos, (Adaptação, Callister, 2007).

Esse esquema tem três divisões principais, compósitos reforçados com partículas, os compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais. Os compósitos reforçados com partículas são aqueles onde as partículas têm aproximadamente as mesmas dimensões em todas as direções; Os compósitos estruturais são combinações de compósitos e materiais homogêneos; a continuação se faz uma discussão um pouco detalhada sobre compósitos reforçados com fibras (Callister, 2007).

2.1.2 Compósitos reforçados com fibras

Nos compósitos reforçados com fibras, via de regra, a fase dispersa tem o comprimento bem maior em relação às dimensões da seção transversal, na forma de fibras contínuas ou picadas. Esses compósitos, frequentemente são fabricados com resistências e módulos específicos excepcionalmente altos, que empregam materiais de baixa densidade para a fibra e a matriz. Com o que se obtém razões significativamente altas do limite de resistência à tração e do módulo de elasticidade em relação à densidade relativa (Callister, 2007).

Na Figura 2.2 são apresentados os compósitos reforçados com fibras são subclassificações de acordo com o comprimento da fibra. No caso das fibras picadas, as fibras são muito curtas para produzir uma melhoria significativa na resistência mecânica, se comparadas com os compósitos reforçados com fibras contínuas. Fibras de vidro picadas, são os reforços desse tipo usados com maior frequência; contudo, fibras descontínuas de carbono e aramidas também são empregadas. Esses compósitos com fibras curtas podem ser produzidos com módulos de elasticidade e limites de resistência à tração que se aproximam de 90% e 50%, respectivamente, dos seus análogos com fibras contínuas (Callister, 2007).

As respostas mecânicas desse tipo de compósito dependem de diversos fatores, que incluem o tipo de fibra e matriz usadas, os comportamentos tensão-deformação das fases fibra e matriz, as frações volumétricas das fases e, além desses, a direção na qual a tensão ou carga é aplicada. Neste tipo de matérias as propriedades são fortemente anisotrópicas, dependendo da direção em que são medidas, se vão obter respostas diferentes (Levy e Pardini, 2006).

2.1.3 Fibra de vidro

Esse reforço é o mais usado em compósitos com matriz polimérica, por sua alta resistência à tração, e estabilidade química, a um baixo custo. Têm como desvantagens, seu baixo módulo de elasticidade comparado com outras fibras, auto-abrasividade e à baixa resistência à fadiga quando agregada a compósitos. Na Tabela 2.1, apresentam-se as propriedades para diferentes tipos de fibras de vidro (Levy e Pardini, 2006).

Tabela 2.1 Classificação por módulo de elasticidade (Adaptação, Levy e Pardini, 2006)

Tipo de Fibra	Vidro-E	Vidro-S	Vidro AR
Massa específica (g/Cm ³)	2,54	2,55	2,70
Módulo de elasticidade (GPa)	70	86	75
Resistencia à tração (GPa)	2,40	2,80	1,70

2.1.4 Fibra de carbono

Refere-se como fibras de carbono geralmente a uma variedade de produtos filamentosos compostos por uma grande quantidade de carbono, os filamentos têm de 5 a 15µm de diâmetro, produzidos pela pirólise da poliacrilonitrila (PAN), celulose (algodão, viscose rayon), ou piches de petróleo e alcatrão de hulha (Levy e Pardini, 2006).

Como as fibras de carbono tem elevados valores de resistência à tração, módulo de elasticidade muito elevado e baixa massa específica, ao serem comparadas com outros materiais de engenharia, são utilizadas maioritariamente em aplicações críticas onde a redução de massa é muito importante (Callister, 2007).

As fibras de carbono podem ser classificadas pelo tipo de precursor, ao módulo de elasticidade, à resistência e quanto à temperatura de tratamento final. Na Tabela 2.2, tem-se a classificação por módulo de elasticidade (Levy e Pardini, 2006).

Tabela 2.2 Classificação por módulo de elasticidade (Levy e Pardini, 2006)

Tipo	Módulo de elasticidade maior E1 (GPa)	Resistência/Módulo
Ultra-alto módulo (UHM)	>500	--
Alto módulo (HM)	300-500	5-7.10-3
Módulo intermediário (IM)	<300	10-2
Baixo módulo (LM)	<100	--

2.1.5 Micromecânica clássica para compósitos de matriz polimérica

Uma das principais vantagens da micromecânica é que, tendo-se as propriedades elásticas das fases dum compósito, assim como as frações volumétricas das fases, possibilita-se o cálculo das propriedades elásticas do conjunto (Levy e Pardini, 2006).

Na análise da micromecânica de um compósito, se têm em conta hipóteses simplificadoras para fazer que as equações fiquem mais simples, assim, se considera que tanto as matrizes como as fibras são (i) homogêneas (ii) de comportamento mecânico linear e elástico, (ii) têm as mesmas propriedades sem importar a direção em que se faz a solitação, por tanto isotrópica; além de se considerar as fibras perfeitamente alinhadas e igualmente espaçadas entre si (Levy e Pardini, 2006).

Conhecendo-se os módulos de elasticidade (E_f e E_m) e as frações volumétricas (v_f e v_m) das fibras e da matriz (que é regida pela Equação (2.1), bem como desprezando-se a fração volumétrica de vazios e bolhas de ar do compósito, é possível obter-se os módulos de elasticidade, E_1 na direção das fibras (1, ver direção longitudinal na Fig. 2.2 (a) e equação 2.2) e E_2 perpendicular às fibras (2, ver direção transversal na mesma figura e equação 2.3), numa lamina com reforço unidirecional, aplicando a Equação (2.2) conhecida como a regra das misturas, bem como a (2.3), respectivamente (Levy e Pardini, 2006):

$$V_M = (1 - V_F), \quad (2.1)$$

$$E_1 = E_F V_F + E_M (1 - V_F), \quad (2.2)$$

$$E_2 = \frac{E_F E_M}{E_M V_F + E_F (1 - V_F)}, \quad (2.3)$$

E_1 , Módulo de elasticidade na direção das fibras para a lamina.

E_2 , Módulo de elasticidade na direção perpendicular as fibras para a lamina.

E_F , Módulo de elasticidade das fibras.

E_M , Módulo de elasticidade da matriz.

V_F , Fração volumétrica das fibras.

V_M , Fração volumétrica da matriz.

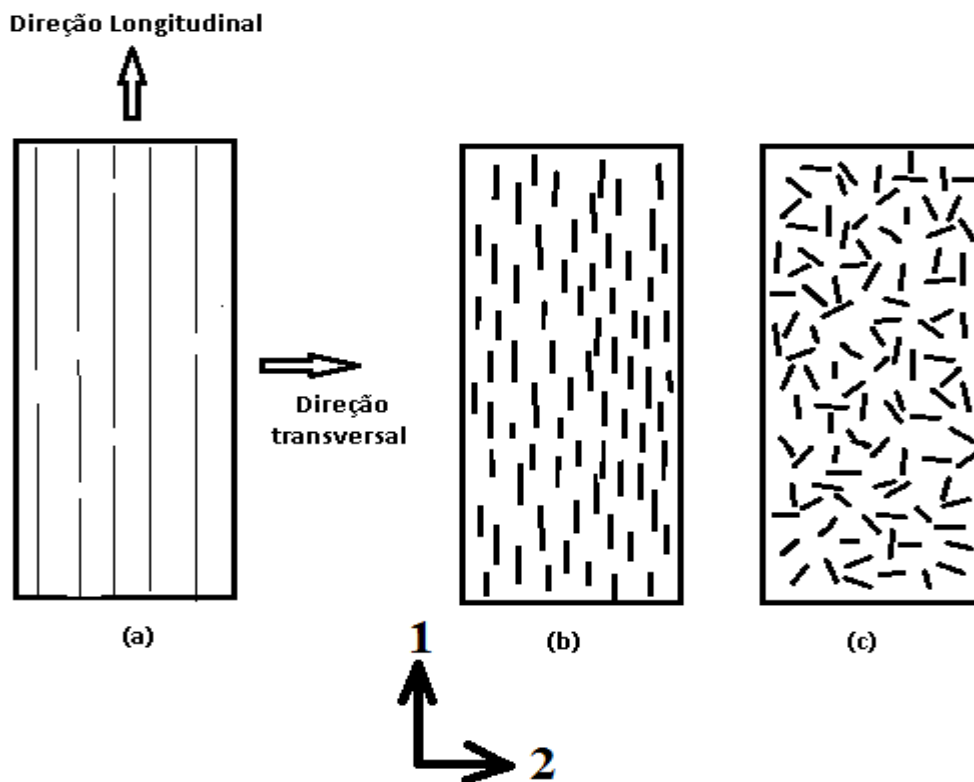


Figura 2.2- Representação esquemática de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, (c) descontínuas e aleatoriamente alinhadas, (Adaptação, Callister, 2007)

2.1.6 Método das áreas para uma viga engastada

Quando se tem uma viga com momento de inércia ou que o módulo elástico varia ao longo de seu comprimento e/ou a força aplicada é variável, um bom método para fazer o cálculo da viga, é o método de áreas (Ugural, 2009). Esse é um método razoavelmente simples, e que pode ser facilmente sistematizado.

Dois teoremas formam a base desse método. Eles são desenvolvidos para uma viga com carga arbitraria, representada na Figura 2.3. Onde na parte (a) da figura, tem-se o diagrama de carga; em (b) o diagrama M/EI ; e em (c) a linha elástica.

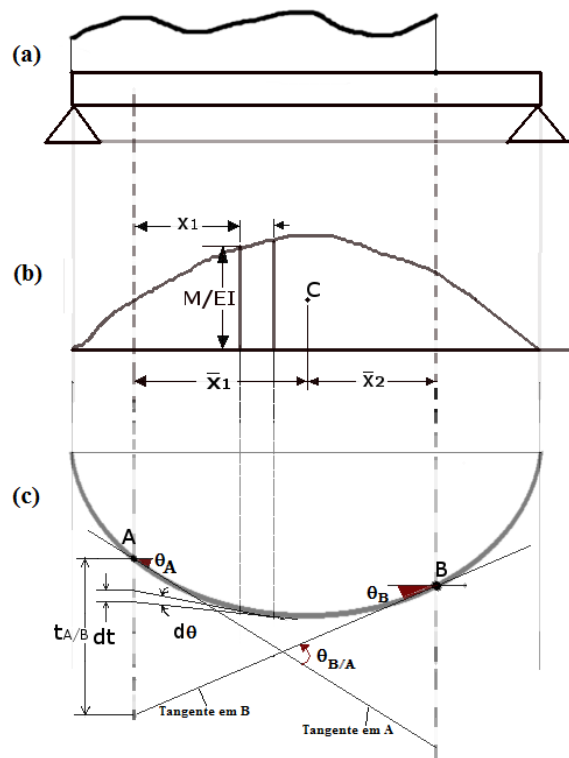


Figura 2.3- Método de momentos de área, (Adaptação, Ugural, 2009)

O primeiro teorema do momento de áreas, diz que a variação no ângulo entre as tangentes que passam por dois pontos A e B da linha elástica é igual à área do diagrama M/EI entre esses pontos, como expresso na Equação (2.4).

$$\theta_{B/A} = \text{área do diagrama } \frac{M}{EI} \text{ entre A e B} \quad (2.4)$$

Enquanto que o segundo teorema diz: o desvio tangencial $t_{A/B}$ do ponto A em relação à tangente em B é igual ao momento em relação a A da área do diagrama M/EI entre A e B, expresso em na Equação (2.5).

$$\delta = t_{B/A} = \left(\text{área do diagrama } \frac{M}{EI} \text{ entre A e B} \right) \bar{x}_1 \quad (2.5)$$

Este método consiste em achar as deflexões que aporta cada região com propriedades similares à deflexão total. Para encontrar as deflexões parciais, primeiro se desenha a viga engastada, e se faz o diagrama de corpo livre dela, colocando nela informação dos centroides de cada segmento com iguais propriedades, as áreas, os comprimentos, como detalhado na Figura 2.4 para uma viga engastada com dois segmentos de propriedades diferentes.

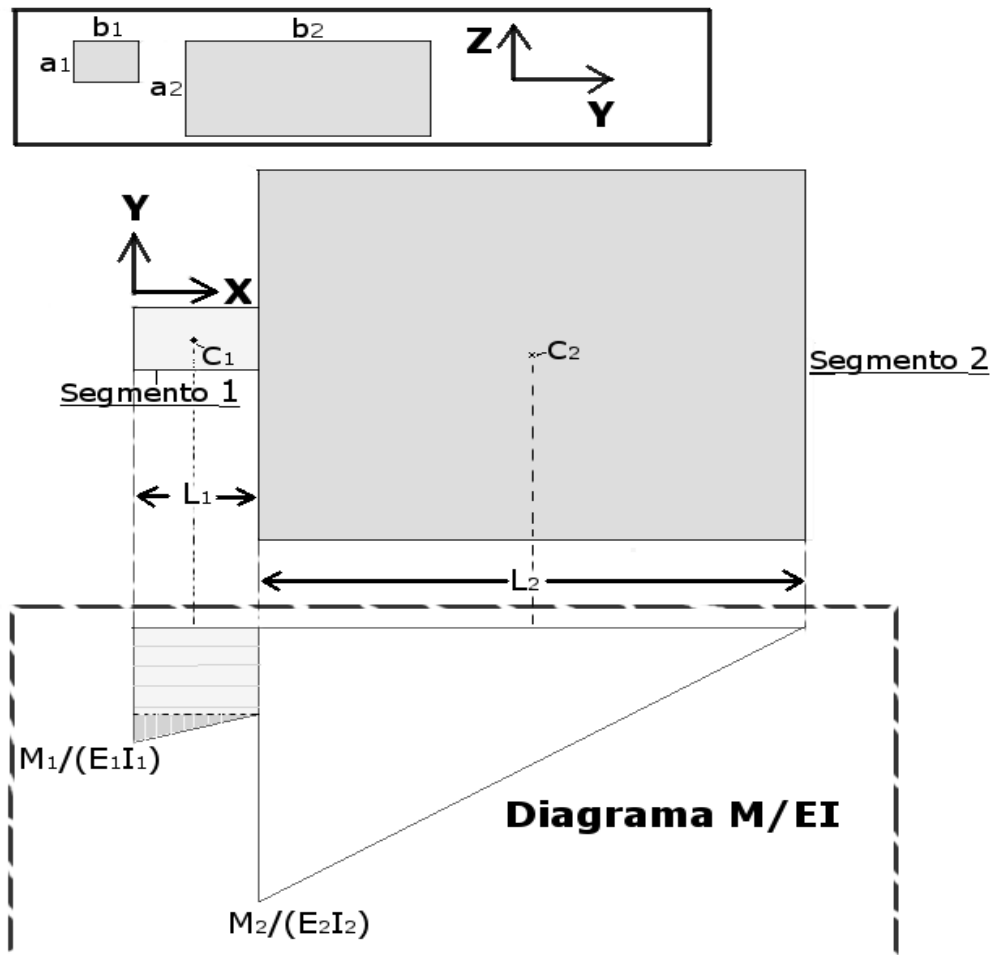


Figura 2.4- Aplicação do método de momentos de área para uma viga engastada com propriedades não uniformes

A continuação mostra-se o calculo para a deflexão do segmento 1, pode-se observar na Figura 2.5 na caixa pontilhada chamada “Diagrama M/EI”, os diagramas dos momentos de área para os dois segmentos. Na Figura 2.5, encontram-se o diagrama para o segmento 1 com os centroides do triangulo e do retângulo, assim a somatória resultante de multiplicar cada área pela distância do seu centroide até o fim da viga dá o valor da deflexão que aporta o segmento exemplo, como está descrito na Equação (2.6).

$$\delta_1 = L_1 \left[\left(\frac{M_1}{E_1 I_1} - \frac{M_1}{E_1 I_1} * \frac{L_1}{L_2} \right) + \frac{\frac{M_1 * L_1}{E_1 I_1 * L_2}}{2} \right] \left(\frac{L_1}{2} + L_2 \right) \quad (2.6)$$

Simplificando (2.6), tem-se:

$$\delta_1 = L_1 \frac{2M_1 L_2 + M_1 L_1}{2E_1 I_1 L_2} \left(\frac{L_1}{2} + L_2 \right) \quad (2.7)$$

Pelo que da Equação (2.7), para calcular a deflexão é preciso ter os comprimentos, os módulos elásticos e conhecer a geometria de cada segmento. Mas também, pode-se calcular algum dos dois módulos conhecendo a deflexão total e a geometria.

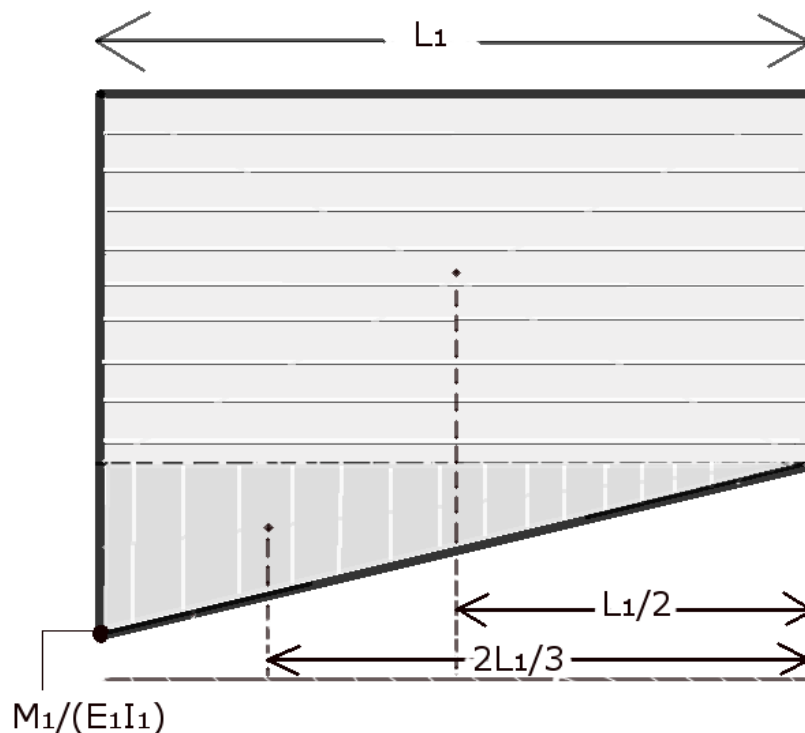


Figura 2.5- Diagrama M/EI para segmento 1

2.2 RUGOSIDADE

A rugosidade pode ser definida como o conjunto de desvios microgeométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes numa superfície. Ela é uma característica importante que afeta e define o modo como às superfícies irão trabalhar e interagir. Geralmente com os acabamentos apropriados é possível definir-se uma faixa na qual estão os valores da rugosidade (Marco e Stockler, 1996).

Ainda que as superfícies sejam cuidadosamente acabadas apresentam defeitos na superfície, como imperfeições geométricas, ondulações e asperezas. Para fazer uma avaliação destes defeitos, se faz a medida de sua rugosidade superficial, o qual não é trivial já que existem inúmeros parâmetros possíveis a medir, como também são usados equipamentos de medidas específicos e os procedimentos são normalizados (Norma NBR ISO 4287/2002), os valores dessas medidas se expressam em micrômetros.

Para avaliar a rugosidade é preciso ter em conta que numa peça estará presente a rugosidade propriamente dita, uma textura secundária associada a ela, e um desvio de forma. A rugosidade será o perfil depois de tirar a textura e o desvio de forma, assim se obterá a rugosidade, como mostrado na Figura 2.6 (Norma NBR ISO4287/2002).

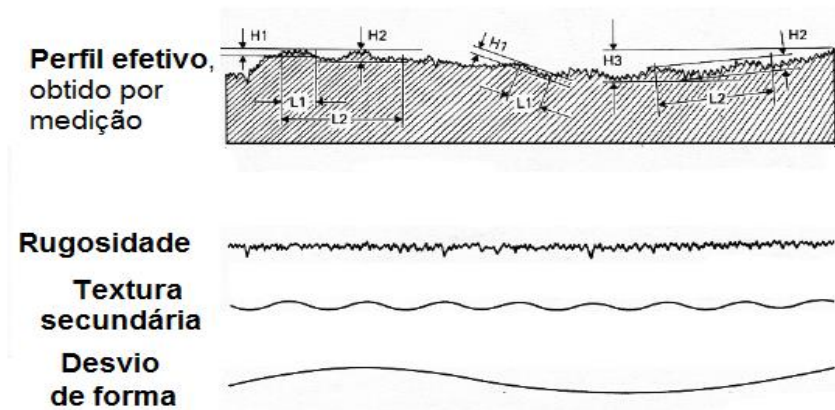


Figura 2.6- Perfil efetivo, (Agostinho, 2004)

Agora para estimar esta rugosidade, têm-se alguns parâmetros estimadores que são usados dependendo do que se deseja avaliar. Os mais usados são os parâmetros de amplitude e os parâmetros de espaçamento, neste trabalho se tem usado três parâmetros de amplitude (Marco e Stockler, 1996).

Os parâmetros usados forma Ra (desvio médio aritmético do perfil), Rq (rugosidade quadrática média) e Rz (rugosidade média).

2.2.1 Desvio médio aritmético do perfil, Ra

Esse parâmetro está definido pela Equação (2.8), é a média aritmética dos valores absolutos dos desvios do perfil a partir da linha média.

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i| \quad (2.8)$$

O parâmetro Ra, tem as seguintes vantagens, é o mais utilizado, pode ser aplicado na maioria dos processos de fabricação, ele está presente na maioria dos equipamentos de medição, riscos inerentes ao processo fazem mudar pouco seu valor (Agostinho, 2004).

Mas, ao obter seu valor como uma média, ele apresenta algumas desvantagens que podem chegar a ser muito importantes. A presença de um pico ou vale atípico oriundo do processo não é identificado, sendo que tende a ocultar defeitos. Seu valor numérico não dá informação das irregularidades, sendo que muitos processos diferentes podem dar o mesmo valor, além de que não distingue entre vales e picos. Por isso, no possível se deve usar com outro parâmetro que o complementa (Agostinho, 2004).

2.2.2 Rugosidade quadrática média, Rq

É a raiz quadrada da média aritmética dos desvios do perfil a partir da linha média, tendo como a Equação (2.9).

$$Rq = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i^2 \right)^{0,5} \quad (2.9)$$

O parâmetro Rq, tem como principal vantagem que acentua o efeito de valores que se afastam da média, o que dá informação de vales e picos maiores, ao contrário do que se apresenta com o parâmetro Ra, onde são mascarados. As desvantagens deste parâmetro é que é complementar, e normalmente precisará de outro parâmetro para poder fazer uma análise, além de não distinguir entre vales e picos, assim como a forma das irregularidades (Agostinho, 2004).

2.2.3 Rugosidade média, Rz

A rugosidade média é a soma das médias dos cinco picos mais altos e cinco vales mais profundos, o que se expressa na Equação (2.10):

$$Rz = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Y_{pi} + \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Y_{vi} \quad (2.10)$$

Esse parâmetro tem como vantagens, que da informação da máxima deterioração da superfície vertical da peça, considera todo o comprimento de avaliação. Sua principal desvantagem, é que pode levar a resultados enganosos, por exemplo, presença de vales profundos (Agostinho, 2004).

2.2.4 Rugosímetro

O rugosímetro é um aparelho dotado dum apalpador com ponta de diamante que, desloca-se certo comprimento sob o material, e é capaz de ampliar a paisagem de vales e pico que apresenta a superfície real, que não se consegue observar diretamente por o olho humano.

Além, o rugosímetro pode determinar parâmetros da rugosidade como Ra, Rq e Rz (entre outros) de acordo com o seguinte processo padronizado. O próprio instrumento divide seu percurso em seis partes: a primeira etapa a usa para toma de referencias e fazer correções de curvaturas; e sob as outras cinco, realiza as medições.

Para fazer as estimações da rugosidade, existem dois tipos de rugosímetro dependendo se se têm ou não contato. Os de contato se caracterizam por ter uma ponta, cuja função é coletar dados, prévio barrido sob a peça e os segundos é aqueles que analisam o material mediante uma linha laser. Ainda que alguns rugosímetros laser tenham contato, é dizer tem integrado apalpador.

Os rugosímetros com apalpador, como o seu nome o indica, esses equipes se compõem dum apalpador, que percorrem a superfície da peça a analisar e um amplificador que mostra ou registra o estado superficial. É importante ter em conta que na maioria dos rugosímetros os percorridos da ponta vão desde 0,08mm a 25,0mm.

Dentre dos rugosímetros com apalpador se encontra outra classificação de acordo com desenho da ponta:

- Rugosímetro com apalpador indutivo: neste equipo o movimento da ponta, modifica o comprimento do entreferro do circuito magnético, e assim o fluxo do campo magnético que o atravessa, gerando o sinal elétrico a ser medida.

- Rugosímetro com apalpador capacitivo: o movimento vertical da ponta aproxima duas lamínas dum condensador, modificando sua capacitância e assim o sinal elétrico.

- Rugosímetro com apalpador piezoelétrico: neste instrumento o movimento da ponta comprime ou estica um material piezoelétrico, o qual responde a essa deformação gerando um sinal elétrico.

- Rugosímetro de patim mecânico: neste equipo o patim se encarga de descrever as ondulações da superfície, enquanto o apalpador percorre os picos e vales do perfil, desta maneira a ondulação e a rugosidade são separadas mecanicamente.

- Rugosímetros laser com apalpador: nestas equipes o sistema de amplificação no lugar de ser elétrico, é ótico. Pelo que o equipo é mais preciso. A amplificação se faz por interferometria, amplificação de luz pela emissão estimulante da radiação, usando um laser de frequência estável.

- Rugosímetro com apalpador laser: A característica principal destas equipes é a ausência de apalpador mecânico ao em vez disso tem um apalpador laser com longitude de onda típica de 800 nm.

Em geral, o tempo em fazer uma medição com o rugosímetro é de alguns segundos, na verdade é o tempo que demora a ponta em fazer o percurso sob a superfície da peça. Saber qual rugosímetro usar depende do tipo e de quantos parâmetros da rugosidade precisam ser medidos. Pois, em alguns processos se exige características superficiais especiais que necessariamente tem que ser supervisionados através da informação estatística do equipamento.

O controle da rugosidade é de grande importância, já que com esta permite-lhe ao operário conhecer com maior rapidez e precisão quais processos se ajustam mais aos requerimentos

de determinada peça. De fato o grau de rugosidade, determina-se no momento do desenho inicialmente normalmente. Neste sentido o desenhador há de especificar o grau de suavidade que deve ter a peça com o fim de obter um rendimento otimizado da peça na qual vai ser utilizada posteriormente.

Da mesma maneira, durante o processo de fabricação, é importante ter em conta o sentido que a rugosidade tenha em determinada peça, pelo que se se trata de superfícies que hão de ter deslizamento uma com outra, o conveniente é que as rugosidades tenham o mesmo sentido seja multidirecionais; pelo contrario se as peças ficam em repouso uma sob a outra, convém que o sentido da rugosidade esteja situado opostamente.

Esse processo consiste em percorrer a superfície com um apalpador, acompanhado de uma guia (patim). Enquanto o apalpador acompanha a rugosidade, a guia (patim) acompanha as ondulações da superfície. O movimento da agulha é transformado em impulsos elétricos e registrados no mostrador e no gráfico.

2.3 CONCEITOS ESTATÍSTICOS

Usaram-se, alguns conceitos estatísticos para analisar os desvios do conformado geométrico e da rugosidade, como o são, incerteza, função log-normal, teste de normalidade, transformação de dados, pelo que é importante fazer uma definição deles.

2.3.1 Média e desvio padrão de médias

Segundo Baird (1991), quando se tem dados obtidos a partir de outros, pode-se estimar novos descritores estatísticos, tendo-se em conta que os valores com maiores desvios são menos importantes estatisticamente. Assim como o mostram as Equações (2.11) e (2.12) para a média de médias, e o desvio padrão de desvios padrões respetivamente, a menor desvio se terá uma maior importância ponderada dele.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i / S_i}{\sum_{i=1}^n 1 / S_i^2} \quad (2.11)$$

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / S_i^2}{(N-1) \sum_{i=1}^n 1 / S_i^2} \quad (2.12)$$

2.3.2 Media geométrica e função log-normal

Á função log-normal, rege-se por uma equação similar à da função gaussiana ou normal, a diferença está fundamentada em que no expoente, a expressão “(x- μ)”, está com logaritmo natural. Box et al (1978) indicam que as seguintes Equações (2.13) e (2.14) se representam as funciones gaussiana e log-normal respetivamente (Box et al, 1978).

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.13)$$

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.14)$$

Essa é muito similar à equação que mostra o comportamento duma função normal ou gaussiana, só que ela tira logaritmo natural aos dados, ao não ser por isso, as funções seriam equivalentes. Como resultado disso a função log-normal não é simétrica e tende a dar maior peso aos menores valores da variável, como se vê na Figura 2.7.

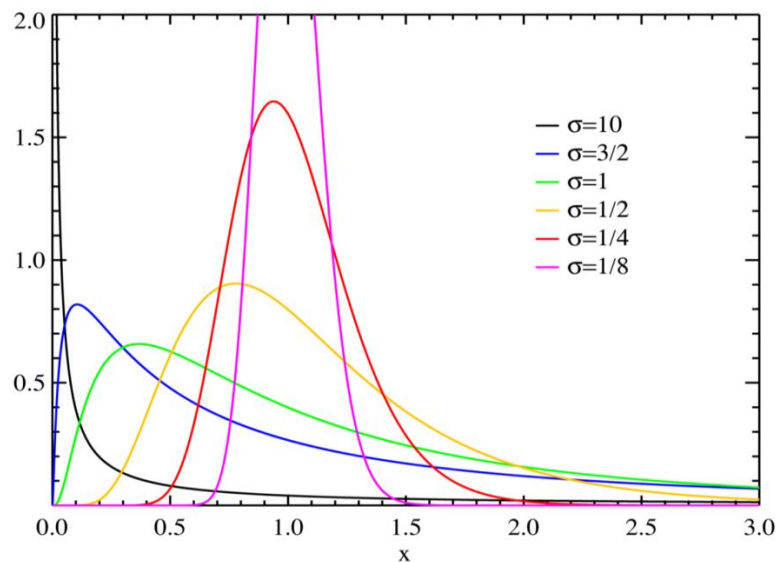


Figura 2.7- Gráficas de log-normal mudando o valor do desvio padrão, e mantendo a mesma media, (http://en.wikipedia.org/wiki/log-normal_distribution entrada 12/05/2013)

Na anterior figura, pode-se ver que quando desvio padrão diminui a log-normal, parece-se mais com uma distribuição normal. Como a distribuição é assimétrica, precisa-se achar de outra forma das faixas de confiança que em populações simétricas (Behar e Grima, 2010).

Essas faixas acham-se a partir das médias geométricas e desvios padrões geométricos, ao invés dos análogos aritméticos como em populações gaussianas. As faixas de confianças de 68% e 99,7% são calculadas usando as Equações (2.15) e (2.16) respectivamente, uma gráfica representativa delas é apresentada na Figura 2.8.

$$\left[x - \frac{\mu_{geo}}{\sigma_{geo}}; x + \mu_{geo} \times \sigma_{geo} \right], \quad (2.15)$$

$$\left[x - \frac{\mu_{geo}}{\sigma_{geo}^3}; x + \mu_{geo} \times \sigma_{geo}^3 \right], \quad (2.16)$$

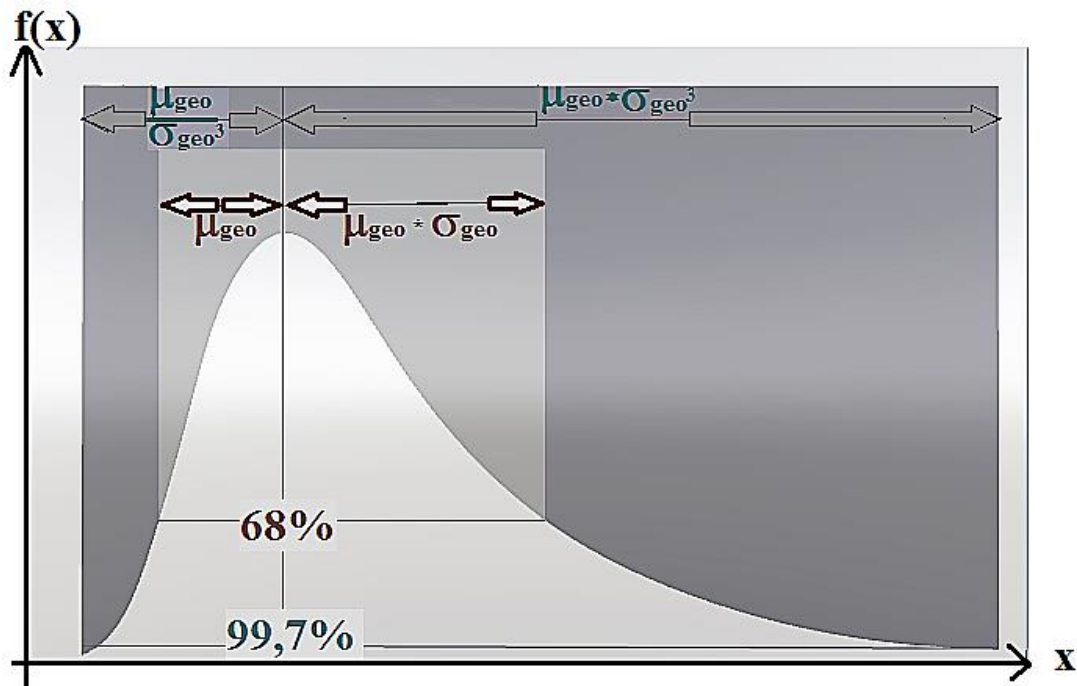


Figura 2.8- Distribuição log-normal com faixas de confiança de 68% e 99,7%

2.3.3 Teste de normalidade

Antes de fazer qualquer estudo estatístico é preciso fazer um teste de normalidade para garantir que é válido o uso da estatística gaussiana. Um dos testes mais simples é o descrito

por Box et al. (p. 330, 1978). Devem ser ordenados os dados de menor a maior, calcular-se á média dos dados, para finalizar calculando os parâmetros “p” e “Xc” com as Equações (2.17) e (2.18). Faz-se o gráfico “p VS Xc”, mostrado na Figura 2.9, para avaliar o comportamento dos dados, se o gráfico, ajusta-se a uma reta os dados pertencem a uma distribuição normal.

$$p=(i - 0,5) * \frac{100}{N}, \quad (2.17)$$

$$Xc = \bar{x} - x, \quad (2.18)$$

Onde N é o número de dados, x são os dados e \bar{x} é a média dos dados.

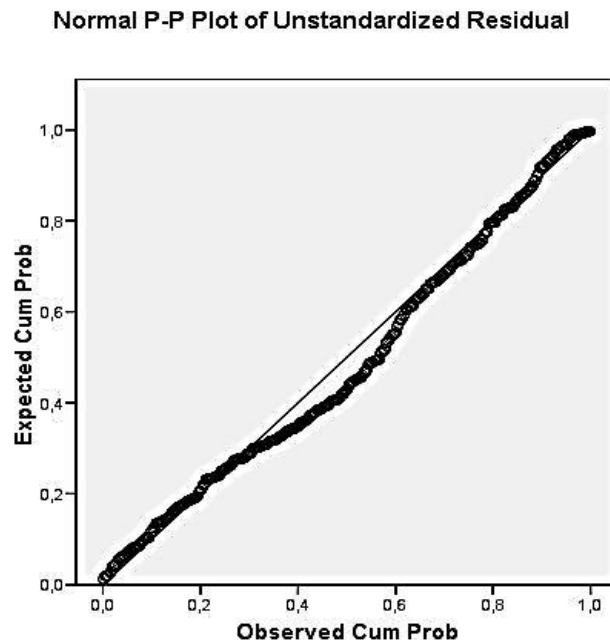


Figura 2.9- Teste da normalidade para uma distribuição,
(<http://tpcsdapatricia edasofia.blogspot.com.br>, acesso 16/05/2014)

2.3.4 Dados em intervalos não igualmente distribuídos

No caso de populações não gaussianas, pode não ser interessante usar um tamanho de intervalo igual para fazer uma análise. Assim, por exemplo, tem-se uma população que têm os seguintes dados numa simulação de dados não gaussianos de um experimento, mostrados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Dados de um experimento com comportamento não gaussiano

2,1	3,1	3,2	3,3	4,2	4,3
4,4	4,5	4,6	5	5,05	5,1
5,1	5,15	5,18	5,2	5,2	5,3
6	6,02	6,2	6,3	6,3	6,9
7	7,4	7,8	8,8	9,2	13

Ao se desenhar esses dados versus ele mesmo temos a Figura 2.10, com a finalidade de ver a distribuição dos pontos. Se os dados foram gaussianos na figura se veria uma acumulação de pontos no centro do gráfico, além de que nos extremos se encontrariam menos pontos (Box et al, 1978). Nesses dados não se pode ver uma acumulação no centro da reta, e sim uma maior densidade de dados para os valores mais baixos.

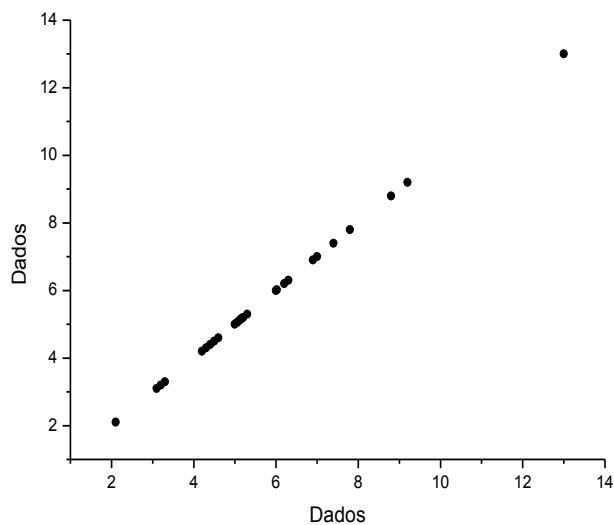


Figura 2.10- Dados não gaussianos versus eles mesmos

Se se quer melhorar a visibilidade de como estão os dados distribuindo-se ao longo da reta, e se quer melhorar a continuidade dos dados, que é caso de esta pesquisa para os dados da rugosidade em especial, pode-se fazer uma distribuição dos dados em intervalos de diferentes tamanhos, segundo Behar e Grima (2010). Assim não se modifica

essencialmente o comportamento dos dados e se se ganha em manipulação numérica, isto é valido para intervalos pequenos, e em seguida se diz que é pequeno.

Neste trabalho, foi preciso fazer o cálculo da primeira derivada dos dados para transformar-lhes em dados duma população gaussiana, que é o tópico que segue deste. Para fazer isso, precisa-se que os dados sejam mais suaves matematicamente, é dizer que pelo menos exista a segunda derivada.

No caso de uma distribuição normal, tem-se que o estimador mais verossímil é a media. E se os dados estão agrupados, esse fato para que continue sendo certo, precisa-se escolher muito bem o tamanho dos intervalos.

Se o tamanho dos intervalos fosse “ hS ”, onde h é um numero positivo, que dá o quanto queremos nos aproximar aos dados, e S o desvio padrão. A Tabela 2.4 tem os dados de eficiência para alguns valores de h , para populações gaussianas de menos de 100 dados.

Tabela 2.4 Eficiência dada por o fator “ h ”

h	Eficiência (%)	h	Eficiência (%)
0,2	99,7	1,2	89,3
0,4	98,7	1,4	86,0
0,6	97,1	1,6	82,4
0,8	94,9	1,8	78,7
1,0	92,3	2,0	75,0

A eficiência se refere, segundo Behar e Grima (2010), a quanto se manteria do valor do desvio padrão usando um valor de h , com respeito ao se se usaram todos os dados sem agrupa-os.

Mas, ao fazer-se uma distribuição dos dados com intervalos não igualmente distribuídos, por exemplo, escolher que em todos os intervalos se tenham três dados, e $h=0,2$, que tem uma eficiência do 99,7% para dados gaussianos, valor que serve de referencial. Tem-se o comportamento apresentado na Figura 2.11, onde os dados modificados estão em cor vermelha e os dados originais em cor preta.

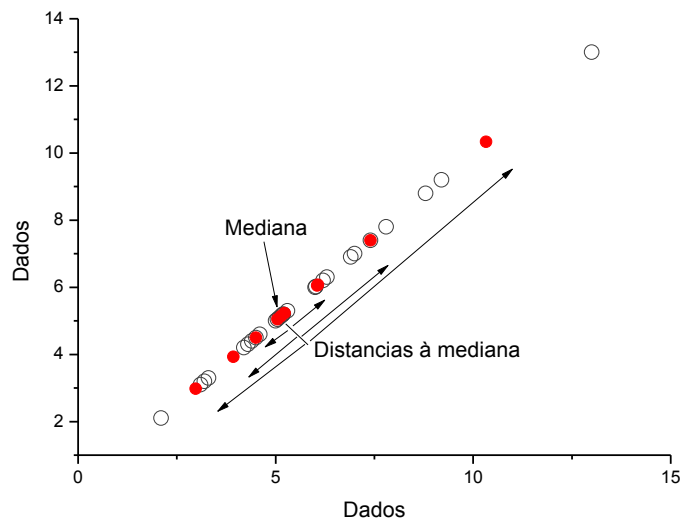


Figura 2.11- Dados não gaussianos versus eles mesmos, (Adaptação, Box et al)

Claramente, pode-se identificar a mediana dos dados e como os dados se vão afastando dela, isso leva a poder assegurar que os dados pertencem a um tipo de população tipo gaussiano, log-normal ou semelhante (Box et al, 1978). Assim, os dados estarão numa função suave matematicamente. Os dados modificados são apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 Dados modificados com $h=0,2$

Media do Intervalo	hS ($h=0,2$)	Intervalo
2,80	0,120	2,69 - 2,92
3,93	0,110	3,82 - 4,04
4,50	0,020	4,48 - 4,52
5,05	0,010	5,04 - 5,06
5,14	0,008	5,13 - 5,15
5,23	0,012	5,22 - 5,24
6,07	0,069	6,05 - 6,10
6,50	0,022	6,43 - 6,57
7,40	0,464	7,32 - 7,48
10,33	0,080	9,87 - 10,80

2.3.5 Transformação de dados

Uma distribuição não normal pode ser transformada a uma distribuição normal usando várias formulas que em geral dependerão do tipo de população de estudo. Aqui foram usadas distribuições log-normal, nesse caso a Equação (2.19) é a indicada por Box et al (p.288, 1978), onde “ λ ” é um valor a ser ajustado para os dados experimentais “ y ”, obtendo-se os valores transformados “ $y^{(\lambda)}$ ”.

$$y^{(\lambda)} = \frac{y^\lambda - 1}{\lambda y^{\lambda-1}}, \quad (2.19)$$

2.3.6 Incerteza

A incerteza de medição é um parâmetro não negativo, associado ao resultado de uma medição, caracterizando a dispersão dos valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (INMETRO, 2012).

A incerteza padrão é o resultado de uma medição expressa como um desvio padrão. A incerteza padrão do tipo A é determinada pela análise estatística dos resultados, a incerteza padrão do tipo B é determinada por outros meios, como experiência anterior, laudos de calibração de padrões, etc. (INMETRO, 2012).

O objetivo da classificação como tipo A e tipo B é para indicar as duas formas diferentes de avaliação dos componentes de incerteza, o propósito exclusivo de análise; Os dois tipos de avaliação são baseados em distribuições de probabilidade, e os componentes resultantes tanto do ponto de como os outros comentários são quantificados por variâncias ou desvios padrão (ISO TAG 4WG-3, 2008).

A incerteza padrão combinada é quando este resultado é obtido por meio de valores de várias outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, sendo estes as variâncias ou covariâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com quanto o resultado da medição varia com mudanças nestas grandezas (INMETRO, 2012).

A incerteza expandida é uma grandeza definida em torno ao resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (INMETRO, 2012).

Quando se fazem medidas, normalmente ela depende de múltiplos variáveis, se supomos que X_1, X_2, \dots, X_N são as variáveis usadas para obter o valor dessa medida, o mesurando, “Y”, pode-se escrever como uma relação funcional, ver Equação (2.20). (ISO TAG 4WG-3, 2008).

$$Y=f(X_1, X_2, \dots, X_N), \quad (2.20)$$

A sua vez essas variáveis podem ser função de outras, além de que nem sempre podem ser achadas todas ou não é pratico. Pelo que, pode ser difícil escrever uma relação explicitamente (ISO TAG 4WG-3, 2008).

2.3.6.1 Determinação da incerteza padrão Tipo A

A variância estimada u^2 que caracteriza uma componente de incerteza obtida é calculada a partir de uma série de observações repetidas e é a variância estimada s^2 . O desvio padrão estimado u , é raiz quadrada positiva u^2 (ISO TAG 4WG-3, 2008).

Assim, a incerteza tipo A é obtida a partir de uma função densidade de probabilidade derivado de uma distribuição de frequência observada, em quanto que uma incerteza tipo B é obtida a partir de uma função de densidade de probabilidade assumida, com base a grau de desconfiança ocorreu do evento (ISO TAG 4WG-3, 2008). Na grande maioria dos casos, a melhor estimativa para o valor esperado de uma quantidade que varia aleatoriamente e para o qual temos n leituras independentes k obtidas sob condições de repetitividade, corresponde a média aritmética (ISO TAG 4WG-3, 2008).

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k, \quad (2.21)$$

Assim, quando a estimativa de uma grandeza de entrada x_i tem sido obtida de n medidas sob condições de repetitividade, a incerteza padrão $u(x_i)$ é obtida pela estimativa da variância da média. Esta é dada por (ISO TAG 4WG-3, 2008):

$$S_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (2.22)$$

2.3.6.2 Determinação da Incerteza padrão combinada (u_c)

A incerteza padrão do resultado de uma medição, quando este resultado é obtido por meio de valores de várias outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, sendo estes as variâncias ou covariâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com quanto o resultado da medição varia com mudanças nestas grandezas (Piratelli, 2012).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i), \quad (2.23)$$

Donde f é a função dada na Equação (2.9). Cada $u(x_i)$ é avaliada como incerteza Tipo A ou Tipo B. A incerteza padrão combinada $u_c(y)$ é estimada e um desvio padrão caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando Y .

2.3.6.3 Determinação da incerteza expandida (U)

Definida como a grandeza definindo um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (Piratelli-Filho et al., 2012).

Definindo um intervalo para um nível de confiança ou probabilidade de abrangência (p) (95- 99%), a incerteza expandida está dada pela Equação 2.24.

$$U = k \cdot u_c(y), \quad (2.24)$$

Onde k é definida como fator de abrangência e é determinado com base na probabilidade de abrangência (p), usando a distribuição t de Student considerando o número de graus de liberdade efetivo (v_{eff}) definidos pela 2.25. (Piratelli-Filho et al., 2012).

$$v_{eff} = \frac{u_c(y)^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u^4(x_i)}{v_i}}, \quad (2.25)$$

2.4 PÁS EÓLICAS

Na indústria moderna de pás eólicas para aerogeradores, os materiais compósitos reforçados com fibras tem uma predominância dos 95% do mercado, pelas ótimas propriedades mecânicas, na rigidez e resistência relativa. Adicionalmente pela durabilidade e que na atualidade o desenvolvimento e aprimoramento dos processos de qualificação, reparação e reciclagem de fim de vida das pás (Attaf, 2010).

2.4.1 Perfis aerodinâmicos

Os perfis aerodinâmicos estão padronizados por agências especializadas em mecânica aerodinâmica e dos fluidos, pelo que podem ser validados e identificados (Selig et al., 1995). Dentre os perfis tradicionais geralmente usados em turbinas eólicas estão os da NACA.

Segundo Selig et al (1995) existe uma grande variedade de perfis NACA para diferentes aplicações e requerimentos. Estes perfis têm cinco dígitos que o caracterizam (Selig et al, 1995):

- Primeiro dígito indica a série do perfil.
- Segundo dígito dá o local de pressão mínima em décimos de corda a partir do bordo de ataque (LE – *leading edge*).
- Terceiro dígito dá o coeficiente de sustentação de projeto, em décimos.
- Os últimos dois dígitos dão a espessura máxima em centésimos de corda.

2.4.2 Geometria da pá

As pás usadas nesta pesquisa foram fabricadas por Carvalho e Bermudez (2010), com uma geometria governada pelo perfil da NACA 63-215, que foi escolhido por que tem um ângulo de “*stall*” grande, um alto coeficiente de sustentação (“*lift*”), CL, e por ter uma boa relação entre o coeficiente de sustentação e o arrasto, que é mostrado na Figura. 2.12.

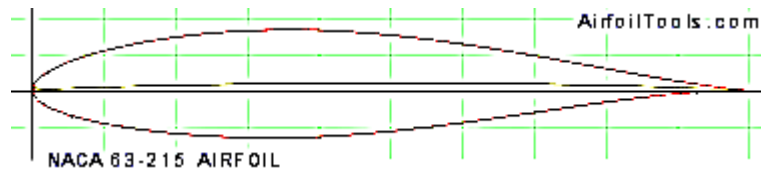


Figura 2.12- Perfil Naca 63-215 representado no eixo cartesiano com corda unitária, (modificação, <http://airfoiltools.com/search/list?page=n&no=1>, acesso 15/05/2014)

Esses autores desenharam um modelo CAD da pá em *Solids Works 2007* com as seguintes características:

- Ângulo de ataque 5,5.
- Raio do rotor 1,18 m.
- Tamanho da pá 0,88 m, o desenho da pá teve um tamanho de 75% do rotor, para dar espaço ao corpo do mesmo, e pela baixa produção de energia nesta seção.

O modelo construído em *Solid Works 2007* por Carvalho e Bermudez foi usado como referência nesta pesquisa. Esse modelo foi reconstruído por falta de uma compatibilidade completa, usando os mesmos parâmetros no programa *Rhinoceros 5.0*, e denominado, GT. Na Figura 2.13, apresenta-se o desenho em perspectiva de GT.

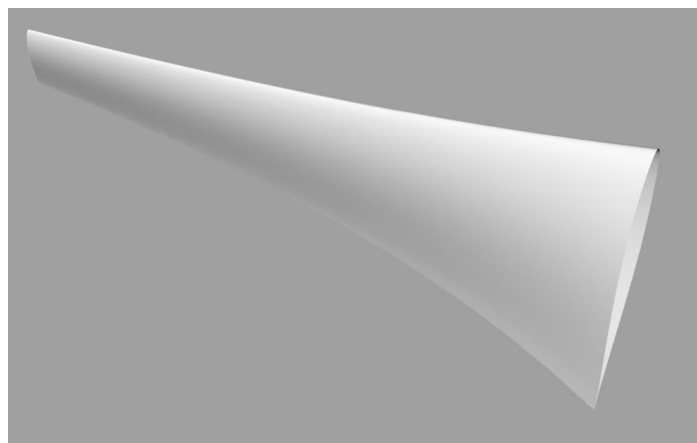


Figura 2.13- Desenho, do modelo teórico da pá com perfis naca 63-215, GT (modificação, souza e carvalho, 2011)

2.5 MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO DE PEÇAS

Para fazer uma avaliação de peças, podem-se usar já seja o método direto ou um método indireto. A comparação direta se fundamenta na verificação do desvio da superfície da peça com outra superfície de uma peça padrão que tenha sido calibrada a sua vez com um padrão de maior qualidade.

No caso da comparação indireta o método baseia-se na medição por coordenadas. As coordenadas de diversos pontos da superfície da peça são determinadas e os erros geométricos são definidos como sendo as diferenças entre os valores medidos e os valores de referência.

É importante que a metodologia seja muito bem escolhida, tendo em conta informações sobre orientação, posição e forma são indispensáveis para uma caracterização unívoca da superfície livre, sem importar o método usado.

Existem algumas boas razões para tentar evitar o método direto, em favor do indireto, ao medir peças complexas. Se se usa o método direto, se terão erros maiores dependentes da habilidade do operário que no indireto, além, dos erros devidos à manutenção e calibração dos próprios padrões. No caso da comparação indireta, como a posição e a magnitude dos erros são fornecidos explicitamente, sua incerteza de medição é geralmente menor.

Para usar o método indireto se usam as denominadas máquinas de medir por coordenadas (MMCs) para a coleta dos pontos. A estratégia para fazer essa medição dos pontos é um compromisso entre obter resultados com a menor incerteza possível, e realizar as medições de maneira econômica. Assim, o operador da MMC deve ter bom senso com a relação custo-benefício. Como consequência natural, a capacitação do profissional que irá operar a MMC deve ser apropriada segundo as peças que a medir, para garantir qualidade das operações (Pizzetti, 2007).

2.5.1 Máquinas de medição por coordenadas, medição por contato

As MMCs são ferramentas poderosas para as que existem poucas peças cujas formas e/ou dimensões não podem ser medidas com uma MMC, pelo que são usadas na maioria dos

laboratórios de metrologia. As melhorias na flexibilidade e na exatidão, acopladas com diminuições de tempo e custo das medições, justificam a rápida aceitação.

Existem dois tipos gerais de MMCs, as que fazem as medições por contato e as sem contato. As MMCs que medem sem contato usam uma sonda laser para fazer a coleta de pontos. Agora, na medição por coordenadas com contato, a informação sobre a geometria da peça é obtida apalpando a superfície em pontos de medição discretos e as coordenadas desses pontos são expressas num sistema de referência pré-determinado.

Os pontos medidos podem servir para fazer uma reconstrução da peça, obtendo-se um modelo experimental, dito modelo serve para a produção duma nova peça ou fazer uma avaliação usando o modelo CAD tridimensional da peça original, usando algum critério matemático de ajuste (por exemplo, best-fit). A partir desse posicionamento podem ser determinados os desvios da superfície real com relação à superfície do modelo, realizando a avaliação de conformidade com as especificações. Esse é o modo mais frequente quando se trata de superfícies de forma livre.

As MMCs podem ser classificadas em dois tipos básicos, conforme a natureza dos movimentos entre partes móveis. Assim as que se baseiam em deslocamentos retilíneos mutuamente ortogonais, denominadas de máquinas “cartesianas”, e as que se baseiam em movimentos de rotação, denominadas de “braços articulados”, na Figura 2.14 se apresentam esses dois tipos de MMCs. A seguir se faz uma descrição sobre as últimas, devido a que se usou uma delas nesta pesquisa.

2.5.1.1 Braço Articulado

As MMCs modelo braço articulado são MMCs que se assemelham com o braço humano, sendo que usam também articulações, que normalmente tem 5, 6 ou 7 graus de liberdade. Elas tem um apalpador que é posicionado manualmente sobre a superfície da peça a medir, a posição das coordenadas é conseguida com o uso de medidores angulares do tipo encoders.

O apalpador pode ser de ponta “seca” ou uma esfera de rubi, no primer caso não se tem que fazer nenhum tipo de compensação à medida, no caso da esfera de rubi, é preciso fazer

uma compensação do radio da mesma, isso geralmente é feito via software de modo automático.

Devido a sua configuração e características construtivas, os braços articulados de medição possuem algumas características vantajosas que podem ser decisivas em determinadas aplicações:

- Grande portabilidade.
- Relação vantajosa entre o volume de medição e o tamanho do equipamento.
- Menor custo em relação às máquinas de medição por coordenadas cartesianas.

Em geral, as incertezas das medições realizadas com as MMCs modelo braço articulado são maiores que as incertezas das medições executadas em MMCs cartesianas. Fatores tais como a habilidade do operador e a rigidez da fixação do braço com relação à peça são críticos e podem degradar fortemente o desempenho metrológico do sistema de medição, a sua vez frequentemente, são menores que no método direto. Na Figura 2.14 são apresentados, os valores médios de incerteza na medida com braços articulados, por meio de um diagrama de causa efeito.



Figura 2.14- Diagrama das fontes de erros num braço articulado (Hamburg-Piekar, 2006)

Como em qualquer MMCs, é necessário fazer a preparação não tão somente da peça submetida à medição como da própria máquina. Tal preparação consiste nas seguintes etapas:

- Limpeza da superfície submetida à medição deve ser bem controlada antes e durante as medições.
- Deve-se garantir que a peça esteja a uma temperatura suficientemente próxima de 20°C, pelo que é recomendável deixá-la uns 30 minutos no ambiente controlado antes de ser iniciada a medição. O tempo que se precisa dependera do tamanho e material da peça.
- Para evitar a movimentação da peça, faz-se preciso fixa-la na mesa da máquina por meio de um dispositivo adequado que garanta sua imobilidade, que vai depender da mesma, porem tendo cuidado de provocar deformações que venham a alterar as dimensões da mesma.

Já seja antes ou depois desse processo, deve-se planejar como se fará a medida, para que só depois de planejar, se execute a medição propriamente dita, que compreende as seguintes etapas:

- Qualificação do apalpador usando.
- Determinação do sistema de coordenadas da posição da peça em relação ao sistema de coordenadas da máquina.
- Medição dos pontos na superfície da peça em relação ao sistema de coordenadas da máquina.
- Avaliação dos parâmetros geométricos na peça.
- Representação do resultado da medição após a transformação do sistema coordenado no sistema de coordenadas da peça.

2.5.2 Medições em ambientes controlados

A temperatura em geral é um fator que influencia nos resultados da medição. Afeta o comportamento dos equipamentos e peças a medir. Por exemplo, se temos um ambiente com ar condicionado ± 2 °C será suficiente para fazer medições em peças de aço, para comprimentos de $20 \pm 0,02$ mm com instrumentos de medição de aço, mas, não é adequado para medir o mesmo comprimento em plástico, devido às diferenças significativas nos coeficientes de expansão entre o aço e plástico.

As vibrações podem afetar de modo importante às medições, assim, é inútil utilizar, por exemplo, um sistema de laser de alta precisão se os espelhos e outros sistemas óticos não estão isolados para a vibração. Além da temperatura e vibrações, tem-se que ter cuidado com a humidade.

Uma mudança na humidade no ambiente de medição pode influenciar fortemente nos resultados, ou incluso ser predominantes quando as peças a medir são de alta sensibilidade à humidade. Para a medição numa caixa de cartão, por exemplo, uma mudança de 5 a 10% têm um maior impacto no controle dos resultados da precisão do erro que em uma caixa de aço.

Assim as condições no laboratório têm que estar de acordo com as medições que se pretendem fazer, e as capacidades dos instrumentos de medição. Não tendo sentido fazer um controle exaustivo na temperatura, por exemplo, quando temos um termómetro com incerteza de 1 °C.

3 METODOLOGIA

Como se devem analisar várias pás (P), reforçadas com fibras de vidro (PV) e carbono (PC) decidiu-se utilizar a nomenclatura, descrita na Tabela 3.1, para a denominação das pás e dos modelos geométricos CAD (modelos numéricos, GT), bem como dos modelos mecânicos estáticos teóricos (MET) delas, com o fim de simplificar e padronizar suas citações.

Tabela 3.1- Nomenclatura usada para as pás e modelos neste trabalho

SIGLAS ADOTADAS	Pás Compósitas	Modelos Geométricos CAD das pás com 180 pontos coletados	Modelos Mecânicos (Teórico)
Modelo Teórico para ás pás em epóxi com reforço em fibra de carbono		GT	MTPC
Modelo Teórico para ás pás em epóxi com reforço em fibra de vidro		GT	MTPV
Pá precursora (molde macho), usada como referência, fabricada com epóxi com reforço em fibra de vidro	PP	GPP	
Pás fabricadas em epóxi com reforço em fibra de vidro	PV1	GPV1	
	PV2	GPV2	
	PV3	GPV3	
Pás fabricadas em epóxi com reforço em fibra de carbono	PC1	GPC1	
	PC2	GPC2	
	PC3	GPC3	

Nesta tabela a letra ‘G’ indica modelo geométrico, ‘T’ teórico, ‘M’ modelo mecânico estático, ‘PP’ pá precursora, ‘PV’ pá com reforço em fibra de vidro, ‘PC’ pá com reforço em fibra de carbono.

O grupo das três pás com reforço em fibra de carbono, PC1, PC2, PC3, são denominadas como PCs, e o grupo das três reforçadas com fibra de vidro-E, PV1, PV2, PV3 como PVs. Os modelos geométricos CAD, só tem informação sobre as superfícies externas das pás,

desse modo GT é o mesmo modelo geométrico para ambos os tipos das, PVs e PCs. Enquanto que MTPC e MTPV são modelos que contém a geometria de GT e adicionalmente tem a informação do material (módulo elástico, coeficiente de Poisson, módulo de cisalhamento), espessura.

Ainda que os modelos CAD geométricos baseados no molde precursor GPP, GPV1, GPV2, GPV3, GPC1, GPC2 e GPC3 sejam similares, ao serem criados a partir dos modelos das pás reais PP, PV1, PV2, PV3, PC1, PC2 e PC3, respectivamente, já não o são, pois as pás não são idênticas. Cabe dizer que os modelos geométricos CAD são usados para análise da superfície externa das pás.

Lembrando, que o objetivo principal desta pesquisa é concluir sobre a forma geométrica e rugosidade no processo de fabricação de pás compósitas. Além, de estudar como o comportamento elástico estático das pás muda, seguindo o mesmo processo de fabricação, mas usando materiais diferentes. Tem-se, procurado uma solução desse objetivo usando a seguinte metodologia, procurou-se bibliográfica para encontrar métodos de avaliação para cada item desejado, seguiram-se as normas para a medição de dados experimentais expostos no livro “*Experimentación: Una Introducción a la teoria de Mediciones, y al Diseño de Experimentos*” de Baird (1991), fez-se os preparativos para as montagens experimentais, adequou-se as condições requeridas para fazer as medições e finalmente mediu-se. Depois, obtiveram-se dados por computador para comparar com os dados experimentais, para finalizar com um tratamento estatístico de erros.

Tal, como foi mencionado na introdução, à pesquisa desenvolvida é uma continuação dos trabalhos de Carvalho e Bermudez (2010) e Pinheiro e Martins (2011), onde se fabricaram as sete pás estudadas. Para o estudo delas se seguiu uma metodologia proposta nesta pesquisa, e baseando-se no método indicado por Piratelli et al. (2011) e Ordoñez (2012,) para a forma e geométrica. Na norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), que indica um método para avaliar a rugosidade de peças. Seguiram-se passos coerentes para a determinação dos módulos elásticos nas pás, primeiramente mediu-se diretamente a deflexão na extremidade livre, ao se colocar uma carga conhecida e logo se usou o método de áreas para uma viga engastada, denominado como “método 1” para encontrar os

módulos elásticos e simulações, denominado como “método 2” para encontrar esses módulos para as pás.

Por isso, apresenta-se uma descrição do processo seguido para a avaliação do conformado geométrico, da rugosidade e do comportamento elástico estático das pás compósitas, com o fim de introduzir uma visão geral, para logo explicar os métodos usados em detalhe.

Para avaliar a rugosidade se mediram as grandezas Rugosidade Aritmética (R_a), Rugosidade Quadrática (R_q) e Rugosidade Média (R_z) com o rugosímetro SJ-201 da MITUTOYO. Essas grandezas foram medidas para todas as pás, mas se fez uma ênfase numa pá do grupo PC (PC1), e numa pá do grupo PV (PV2) escolhidas ao azar. Adicionalmente, fez-se um estudo estatístico do tipo de população e se transformaram os dados a uma população gaussiana. Essa transformação é apresentada no Apêndice 6.2. O método se apresenta na Figura 3.1.

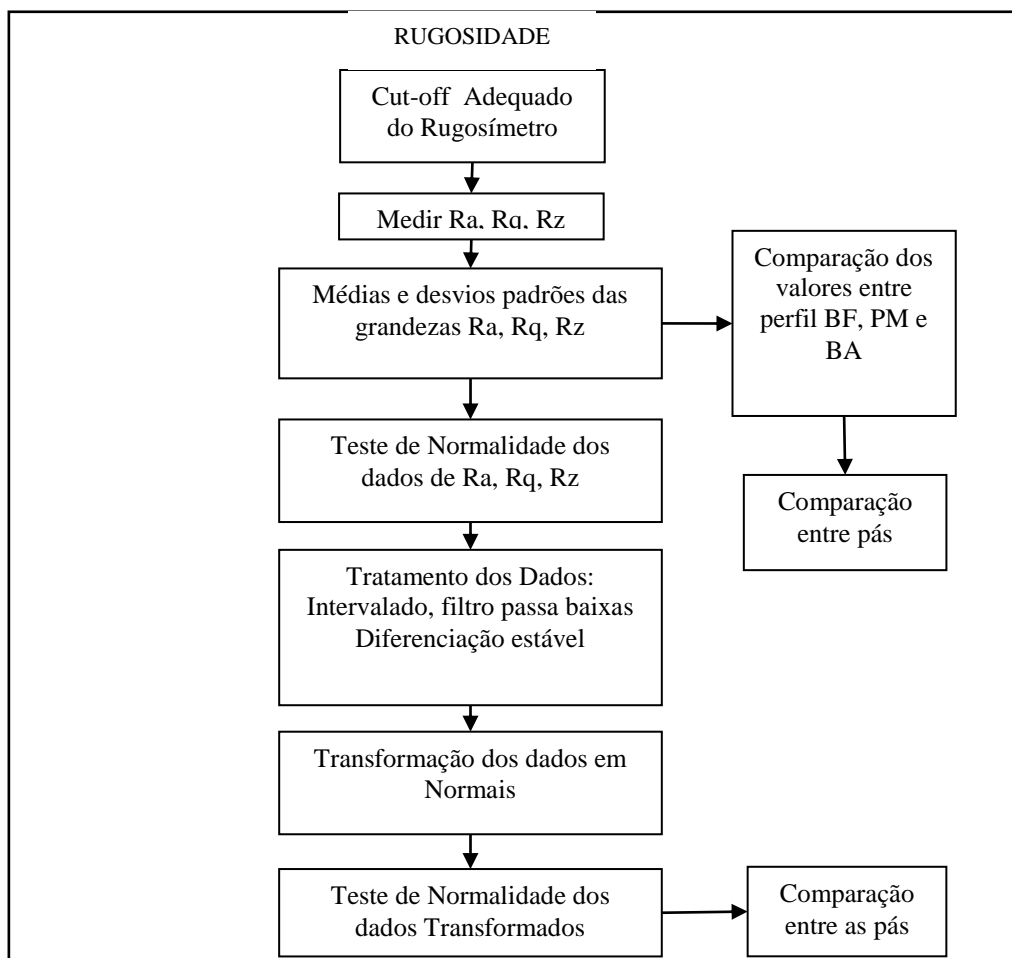


Figura 3.1- Método para avaliar a rugosidade das pás

Para fazer uma comparação da geometria entre as pás, teve-se que fazer um trabalho preliminar de determinação do número de pontos adequado para reconstrução das pás, assim como o número de pontos ao ser usados no análise de cada modelo. Além, de adequar o modelo de Carvalho e Bermudez (2010) para que pudesse ser utilizado como referência na avaliação. Esses três tópicos estão detalhados no Apêndice 3, já que não era o objetivo principal de este trabalho, e na Figura 3.2 apresenta-se um resumo do método. Ainda que esse estudo seja essencial para a avaliação, pode ser suprimido numa primeira leitura.

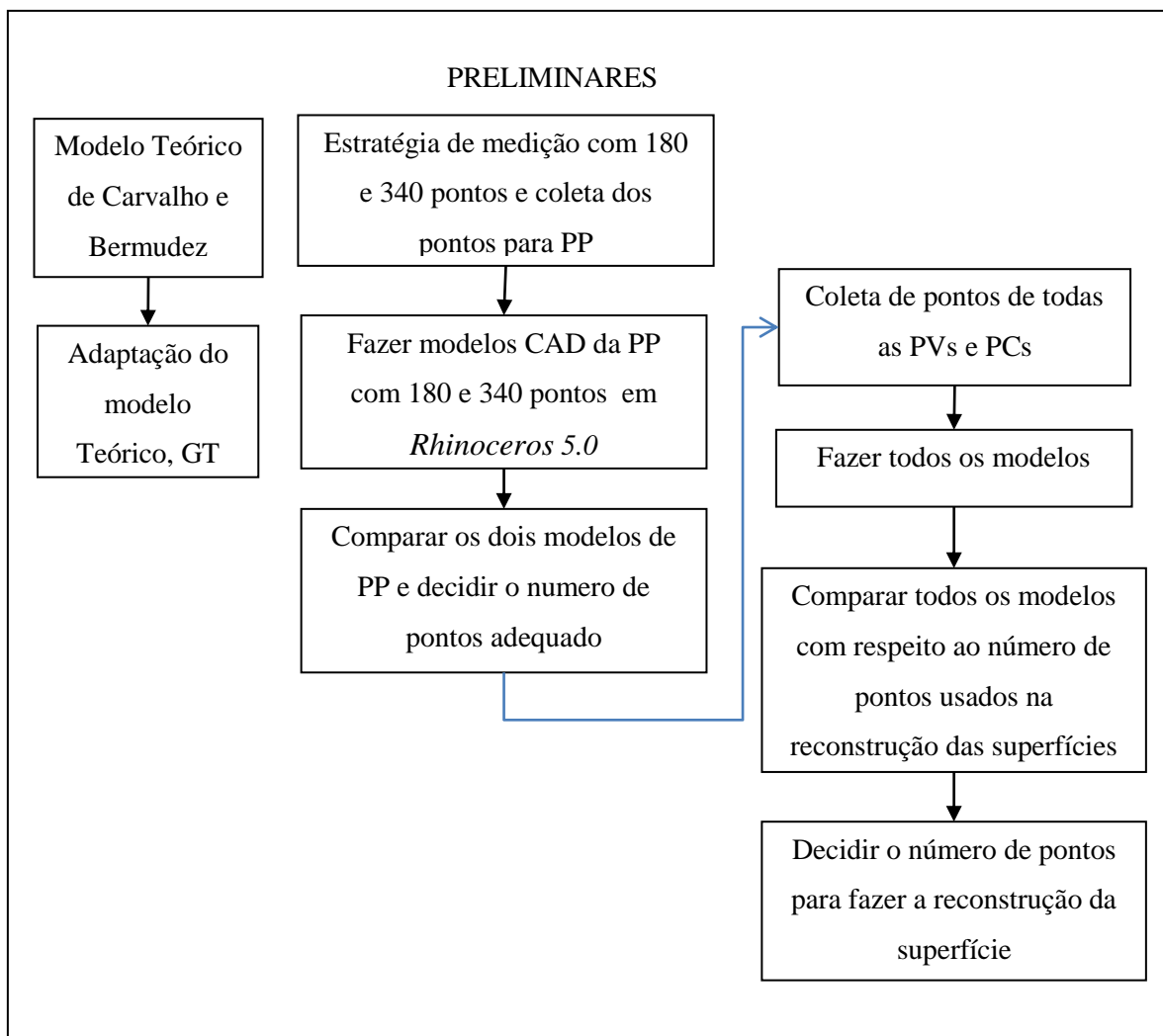


Figura 3.2- Método preliminar para obter os parâmetros a se usar na avaliação da geometria

Obtidos os parâmetros, faz-se a avaliação das superfícies das pás com referência ao GT, seguindo o método apresentado na Figura 3.3. Onde se obtêm os parâmetros de como os pontos coletados se ajustam à superfície do modelo próprio, e além como, os eixos centrais dos modelos estão afastados do eixo central de GT.

MÉTODO PARA AVALIAR A GEOMETRIA

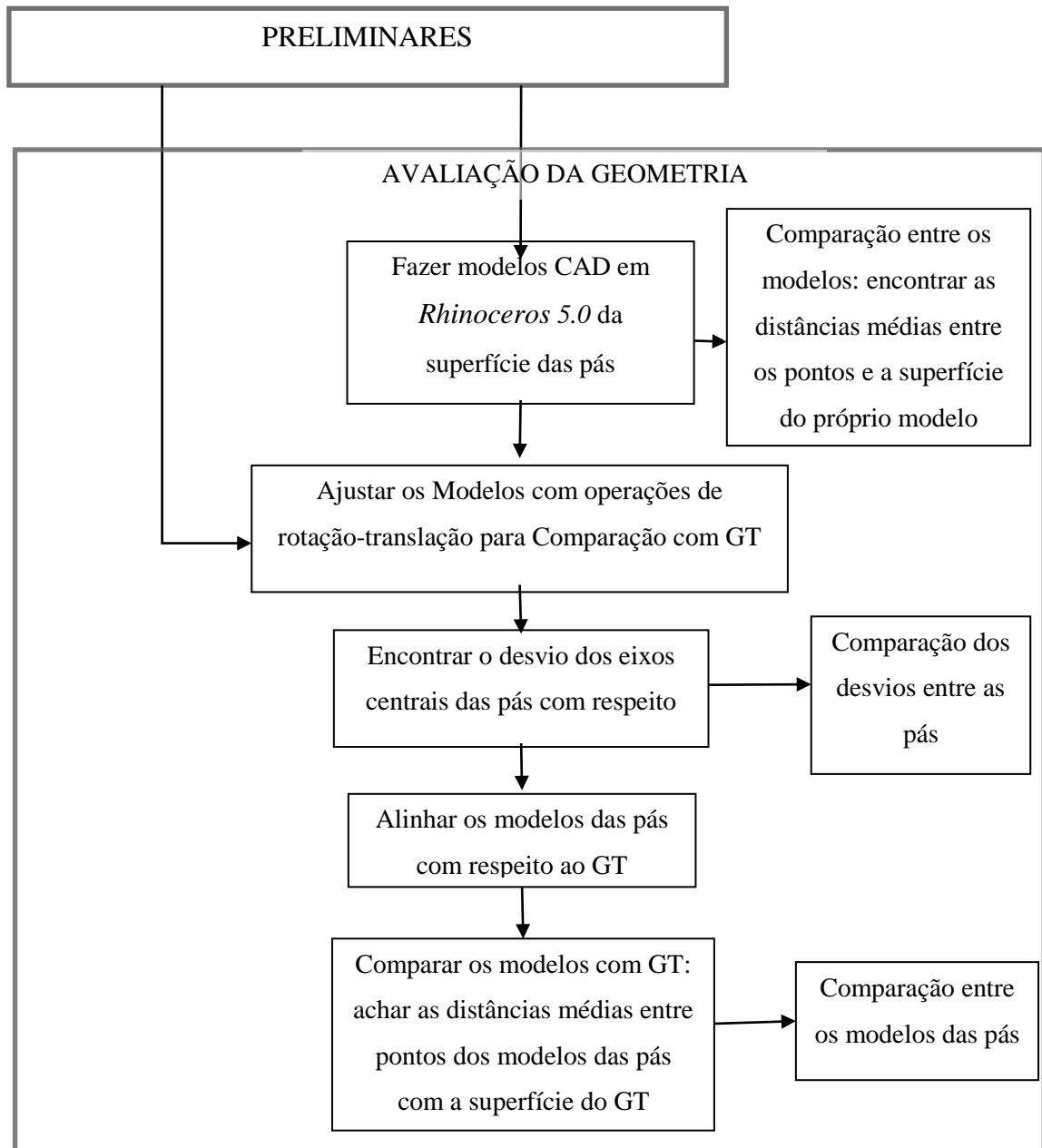


Figura 3.3- Método para avaliação da geometria

Finalmente, calcula-se o módulo elástico para as PCs e PVs, usaram-se dois métodos diferentes. Para ambos os métodos usou-se como entrada deflexões experimentais para cargas conhecidas, GT e a espessura das pás. O primer método consiste numa aproximação da geometria das pás para logo usar o método de áreas para uma viga engastada, e o segundo foi fazer simulações em *ANSYS 14.5* variando os valores dos módulos até obter as deflexões. O método de forma resumida está exposto na Figura 3.4.

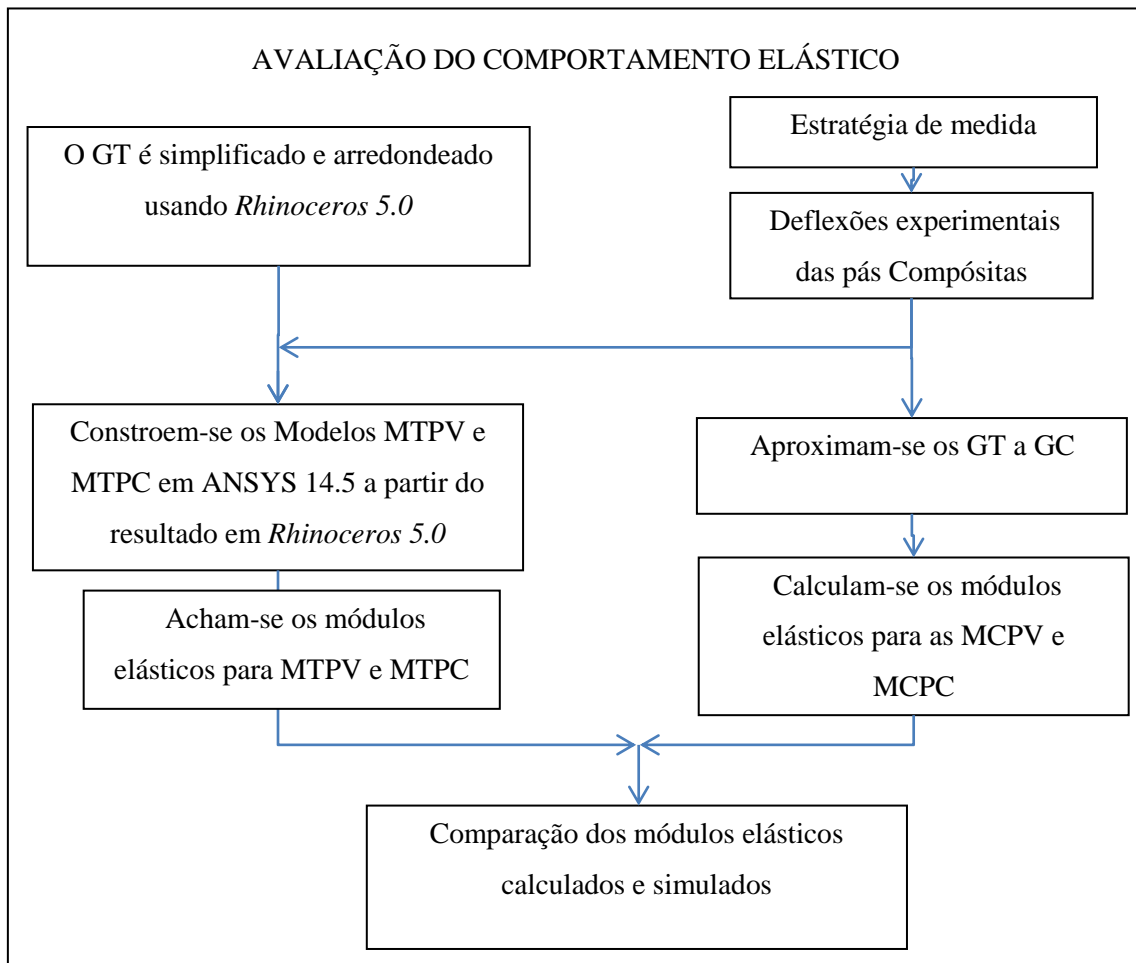


Figura 3.4- Método para avaliação elástica das pás

Com as três avaliações, obtém-se uma avaliação final, como se mostra na Figura 3.5, e, conclui-se o trabalho. A seguir, faz-se uma descrição das pás e dos instrumentos utilizados nesta pesquisa, para entrar depois nas explicações pertinentes sobre o método adoptado para cada avaliação, sobre rugosidade, superfície (geometria) e propriedades mecânicas.

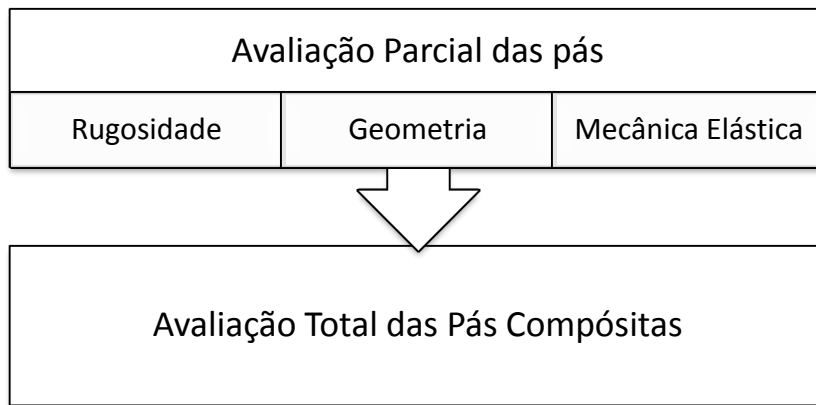


Figura 3.5- Esquema do método geral seguido nesta pesquisa

3.1 DESCRIÇÃO DAS PÁS COMPÓSITAS

Nesta pesquisa, foram usadas sete pás compósitas que foram fabricadas seguindo o perfil NACA 63-215, como descrito na revisão bibliográfica. As características são resumidas na Tabela 3.2, e apresentadas na Figura 3.6. Elas foram construídas a partir do molde-fêmea fabricado por Carvalho et al. (2010), apresentado na Figura 3.7.

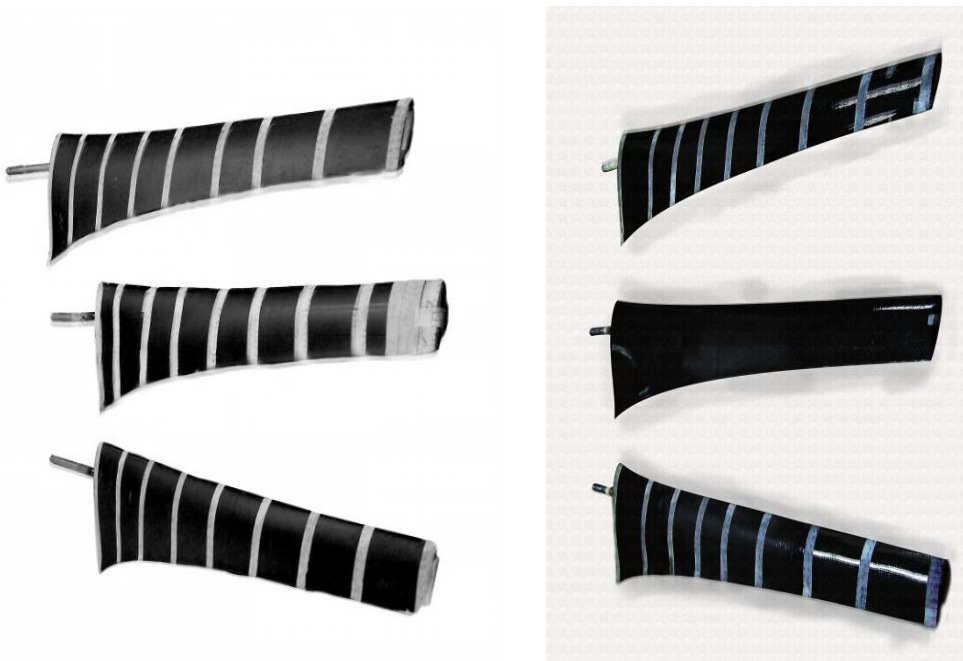


Figura 3.6- À esquerda o grupo das PVs, na direita o grupo das PCs

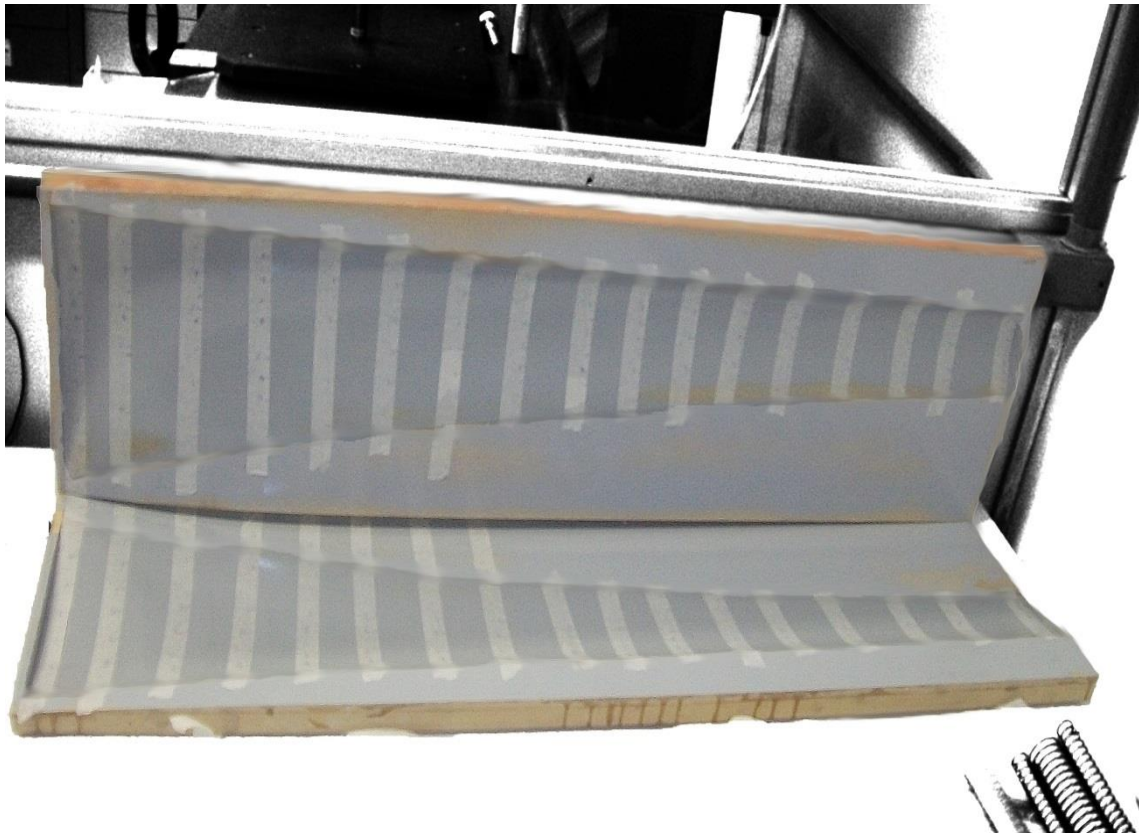


Figura 3.7 - Molde-fêmea das pás

O grupo de PCs está reforçado com tecido de fibras AG370-8H (8 Harness-Satin) de filamentos AS4, com uma espessura nominal de 0,5 mm. O grupo de PVs está reforçado com tecido plano (trama 1x1) de fibra de vidro-E, com uma espessura nominal de 0,55mm. Cada grupo foi fabricado com a urdidura das fibras paralelas à direção longitudinal das pás, tendo como matriz a resina epóxi. No caso das PCs foram fabricadas com uma camada de fibras, enquanto as PVs com duas camadas. As PCs tem uma espessura média experimental de 0,5 mm e as pás PVs ~~tem~~ uma espessura de 1,12 mm.

Os tecidos de fibra de vidro e de carbono foram impregnados manualmente com resina poliéster, consolidados no interior de moldes tipo fêmea, nas seis pás foi obtida uma fração volumétrica de fibras de aproximadamente de 30%.

3.2 DESCRIÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO USADOS

3.2.1 Curvas e superfícies *NURBS*

NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*) são representações matemáticas da geometria 3-D que podem descrever com precisão qualquer forma de uma linha 2-D simples, círculo, arco ou curva em 3-D, de igual forma. Devido à sua flexibilidade e precisão, os modelos *NURBS* podem ser utilizados em qualquer processo de ilustração e animação para a fabricação (Rhino3d, 2010).

Segundo Kowarschik et al, superfície livre pode ser definida como sendo toda e qualquer superfície cuja geometria não pode ser representada por equações matemáticas definidas, sendo então de difícil descrição analítica.

Precisamente, segundo Pizo (2009), as *NURBS* frequentemente são usadas para a parametrização de superfícies de forma livre e outros tipos de geometrias, como formas analíticas a partir duma matemática unificada, o que faz delas uma ferramenta geral e poderosa.

Além, são fáceis de manipular, usando-se um conjunto de pontos de controle e de nós, para guiar a forma da curva, podendo ser diretamente manipulada para controlar sua suavidade e curvatura.

Por isso, tornaram-se de fato padrão da indústria para representação, muitos padrões internacionais como *IGES*, *STEP*, *PHIGS* e *OpenGL*, reconhecem as *NURBS* como ferramentas poderosas para projeto geométrico (Pizo, 2009).

As *NURBS* são ensinadas nas universidades mais importantes do mundo. Isto significa que os fornecedores especializados de software, equipes de engenharia, empresas de desenho industrial, e casas de animação que precisam para criar aplicativos de software personalizados, podem encontrar programadores treinados que são capazes de trabalhar com geometria *NURBS* (Rhino3d, 2012).

Outras vantagens das *NURBS* são (Rhino3d, 2012):

- Suas curvas permitem representar formas arbitrárias enquanto mantém exatidão e independência de resolução matemática;
- Seus algoritmos são rápidos e numericamente estáveis;
- Suas curvas e superfícies são invariantes sob transformações geométricas comuns, como translação, rotação e projeções de perspectiva;
- São generalizações de curvas e superfícies *B-Splines* racionais e não racionais e de curvas e superfícies de Bézier não racionais.

3.2.2 Rugosímetro SJ-201

Para fazer as medições dos parâmetros de rugosidade foi usado o rugosímetro SJ-201, que é mostrado na Figura 3.8, o qual tem integrado um filtro de sinal automático, além de ser capaz de medir os parâmetros Ra, Rq e Rz.

Tem as seguintes características:

- A unidade do drive pode ser separada da unidade principal permitindo a medição em lugares estreitos e de difícil acesso.
- O SJ-201 pode funcionar com adaptador AC, assim como em qualquer lugar usando baterias.
- Ponta de diamante, Raio da Ponta 5 μm .
- Força de Medição 4 mN.
- Raio e curvatura da sapata 40 mm.
- Faixa de Deslocamento do detector 21 mm.



Figura 3.8- Rugosímetro SJ-201 da *MITUTOYO*

3.2.3 Braço Articulado “Arm 100” da Romer

O braço articulado foi fabricado pela Romer, tem como características seis articulações, compondo seis graus de liberdade, o que lhe dá uma grande capacidade de medição de objetos de formas diversas. Além, conta com a possibilidade de referenciar objetos no espaço, o que permite que possa ser trasladado e desta forma medir objetos grandes ou de difícil medida. O braço apresenta uma incerteza expandida a uma probabilidade de abrangência de 95% de $60 \mu\text{m}$ com um fator de abrangência $k= 2,28$, fornecida pelo manual de fabricante, o braço é apresentado na Figura 3.9.



Figura 3.9- Braço articulado Arm 100 da *Romer*

As coordenadas são determinadas com um apalpador de contato, posicionando a superfície da peça e o operador pressiona um botão para capturar o ponto 3D dessa posição, e um software denominado *GPAD* permite salvar as coordenadas usadas na reconstrução da superfície, podendo exportar os dados em formato *Excel* ou *IGES*.

O braço trabalha com dois tipos de ponta para o apalpador, uma denominada de ponta seca (agulha) e outra onde a ponta é uma esfera de rubi. A ponta seca é para uso geral e onde se requer um referencial mais preciso e medição de características da superfície, assim como localização de furos muito pequenos; e a ponta de rubi é apropriada para a maioria das aplicações onde não se tenham superfícies ocultas ou furos.

3.2.4 Calibrador traçador de altura

Os calibradores são fabricados com técnicas aperfeiçoadas visto que suas tolerâncias não devem exceder de um quinto a um décimo das tolerâncias da dimensão a verificar. No caso do calibrador usado nesta pesquisa, tem como valor mínimo a medir $\pm 0,02$ mm, na Figura 3.10 apresenta-se o calibrador de altura usado para obter as deflexões das pás ao ser carregadas com massas conhecidas.

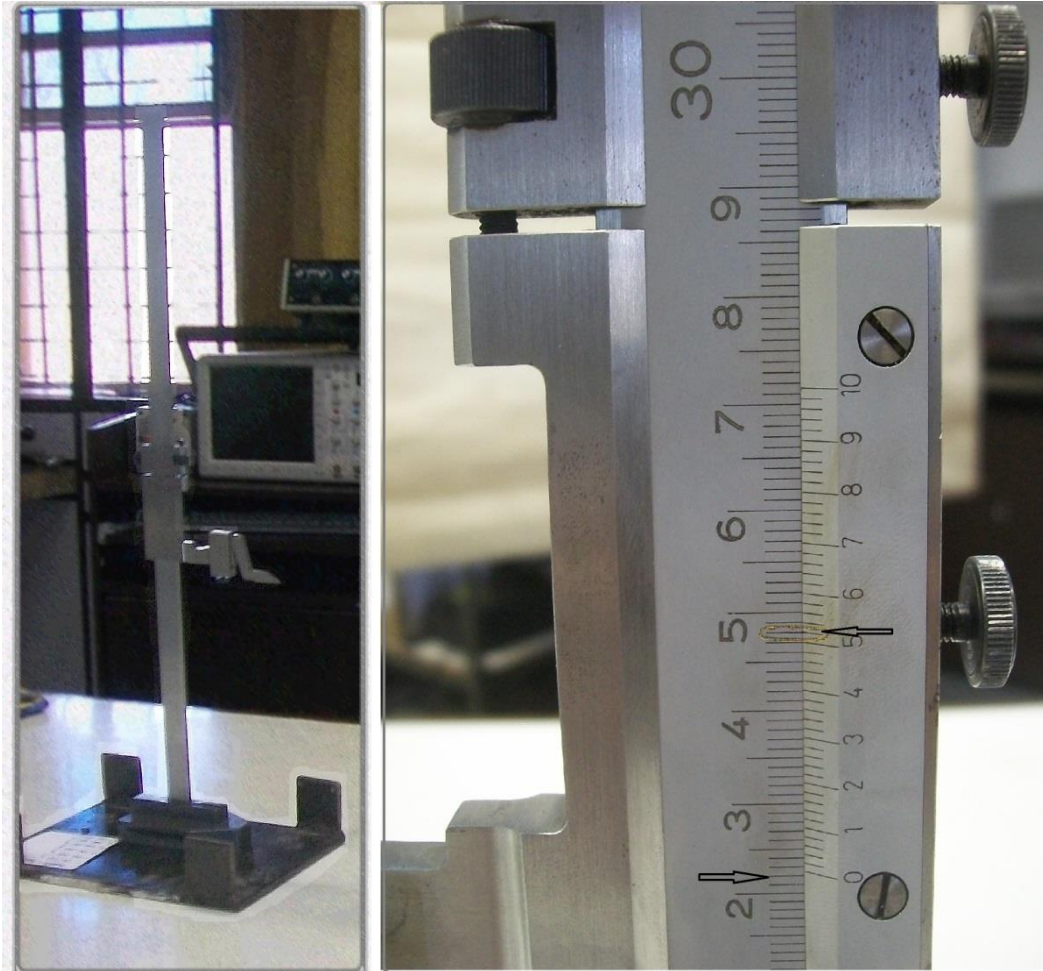


Figura 3.10- Calibrador traçador de altura, a esquerda plano geral do calibrador, a direita primeiro plano do nônio do calibrador

Na figura anterior se mostra o plano geral do calibrador de altura, e o primeiro plano do nônio do calibrador, onde se pode ler como medida 22,52 mm. Cabe lembrar que cada linha do nônio equivale a 0,02mm.

3.3 PREPARAÇÃO DAS PEÇAS PARA A MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE DA GEOMETRIA

3.3.1 Limpeza e fixação das pás

Antes de fazer qualquer medida, tem-se que fazer uma limpeza, e principalmente quando se tratar da medição com rugosímetro e Máquina de Medir por Coordenadas. Como as medidas apresentam uma resolução da ordem dos micrometros, a presença de óleo e partículas pode afetar significativamente os resultados. Esta limpeza deve ser feita com especial cuidado sendo usado álcool etílico para limpar as peças. Na sala, tem-se uma mesa de desempenho onde se fixaram as pás para serem medidas. A Figura 3.11, mostra a mesa onde foram feitas as medições.

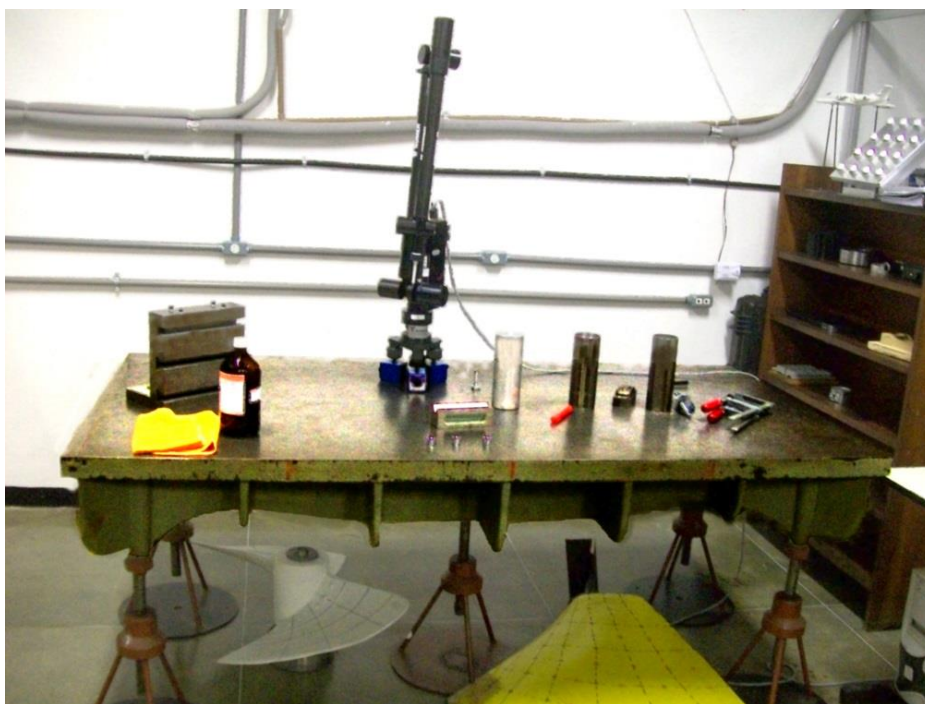


Figura 3.11- Mesa de desempenho onde se fez a montagem para a medição

3.3.2 Controle de temperatura

Deve-se fazer um monitoramento sobre a umidade e temperatura da sala onde se fazem as medições, devido que essas grandezas afetam de forma importante as peças e aos instrumentos de medição. Normalmente se tem como referência uma temperatura de 20 °C,

pelo que se procura que a sala este com uma temperatura ambiente de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, assim para tal fim o laboratório de Metrologia Dimensional conta um termômetro digital que apresenta uma incerteza expandida de $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, com um fator de abrangência de $k=2$ a uma probabilidade de 95% (Certificado de Calibração), além o termômetro tem um medidor da umidade, que sempre esteve indicando valor entre 30 e 50%, ver Figura 3.11. Para garantir uma estabilidade térmica é recomendado deixar as peças a medir na sala pelo menos uma hora antes de fazer as medições.

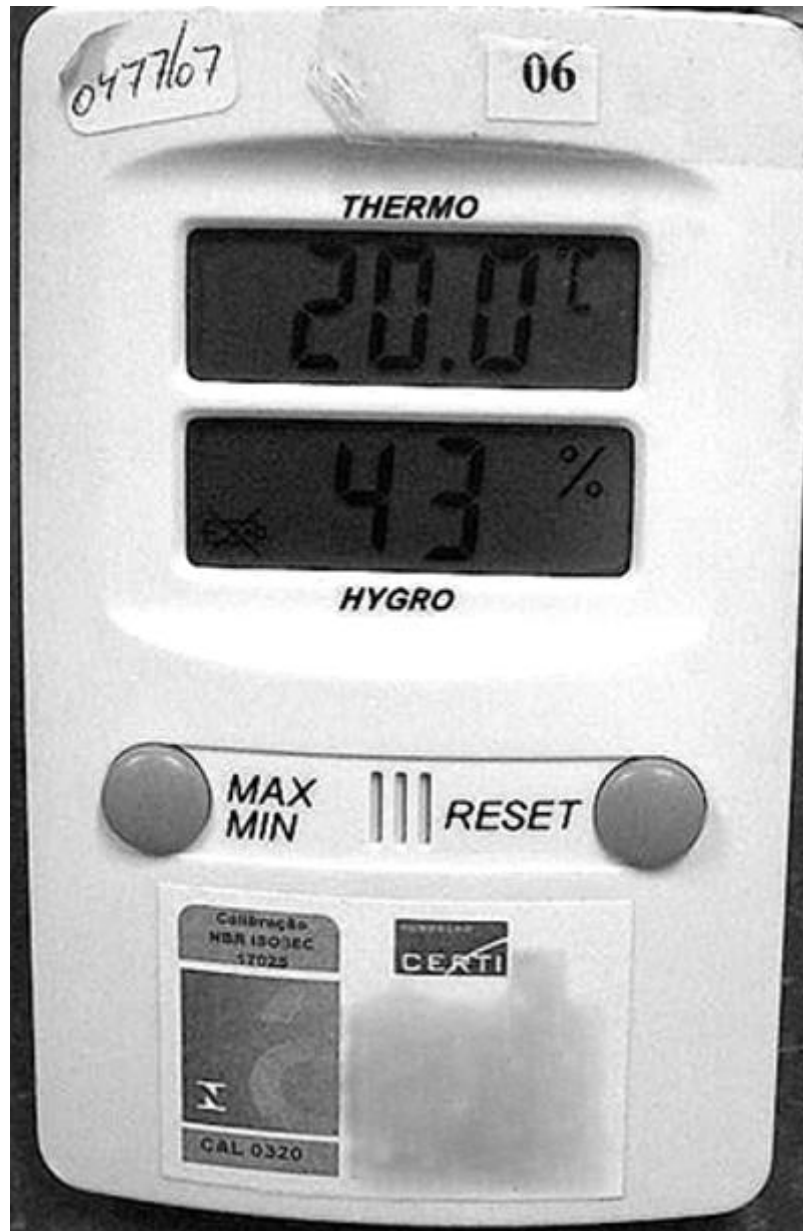


Figura 3.12- Termômetro com sensor de umidade

3.4 ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO E MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

Os valores da rugosidade R_a , R_q , e R_z foram obtidas sob condições controladas de temperatura e umidade. A seguinte estratégia foi adotada: foram medidas as pás fazendo ênfase em duas delas, escolhidas de forma aleatória, uma pá do grupo PC e outra do grupo PV, cada pá foi marcada com lado A e lado B, e cada lado foi dividido em 24 setores como é mostrado na Figura 3.13. Em cada setor se coletaram 10 medidas aleatórias para cada parâmetro nas duas pás escolhidas, nas outras foram medidas quatro valores por parâmetro. Além disso, se dividiu cada lado em bordo de ataque (partes do 1-8), bordo médio (partes do 9-16) e bordo de fuga (as partes do 16-24).

Essa divisão teve o fim de que se obtiveram as grandezas por quadrante, por perfil e pá, para fazer uma comparação dos valores do particular ao geral, além de poder-se fazer uma comparação entre as pás com maior facilidade.

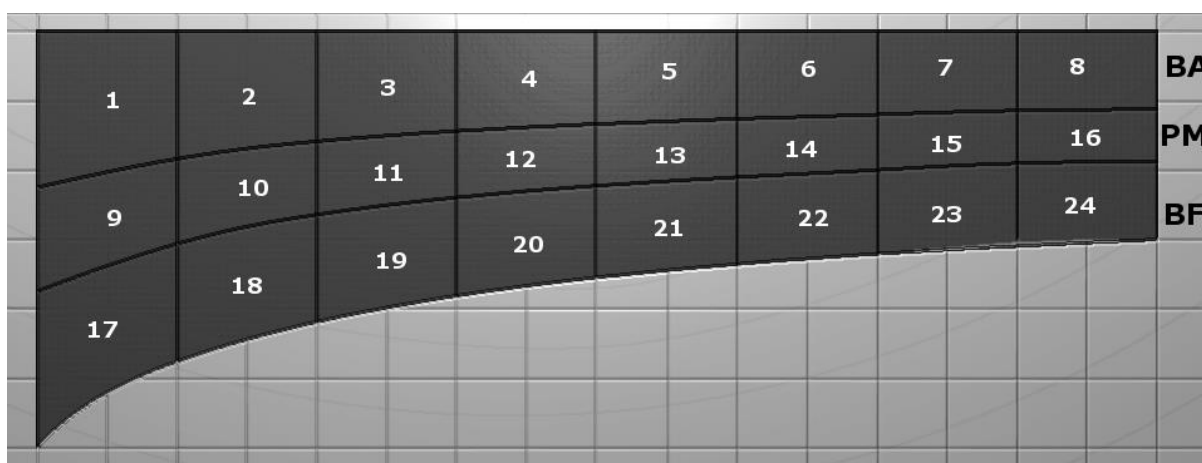


Figura 3.13- Representação dos três setores e as 24 partes em que foi dividida cada pá

3.4.1 Comprimento de amostragem (“Cut-off”) adequado

A superfície das pás foi considerada como aperiódica, já que no processo de fabricação foi manual. Para obter os valores das grandezas seguiu-se a norma ABNT NBR ISO4287 (2002), mantendo condições de temperatura controladas, sendo que as variações de

temperatura estiveram entre 20,0 °C e 21,0 °C. Além as pás foram colocadas o dia anterior na sala e ao dia seguinte foram fixadas e limpas. O método usado foi o seguinte:

- Foi escolhido o parâmetro inicial do comprimento de medição, *cut-off*, em 0,8 mm neste trabalho foram usadas cinco vezes de repetição para obter um valor mais confiável.
- Foram medidos dois locais aleatórios em cada pá com o *cut-off* preestabelecido.
- Foram comparados os valores do parâmetro Ra obtidos com os valores da Tabela 3.1. Nesta tabela, encontram-se os valores e *cut-off* para intervalos da grandeza Ra, quando a rugosidade é aperiódica.
- Para valores fora do intervalo do *cut-off* de 0,8 mm, repete-se o teste, até que o valor de Ra fique no intervalo.

Tabela 3.1 - Valores de *Cut-off* e Intervalos de Medição Recomendados para Rugosidade Aperiódica

Rugosidade Ra (μm)	<i>Cut-off</i> (mm)
Menor ou igual a 0,1	0,25
Maior que 0,1 a 2	0,8
Maior que 2 a 10	2,5
Maior que 10	8,0

Com os *cut-off* selecionados foram feitas as medições de maneira aleatória dos parâmetros, tal como está representado na Figura 3.14, as quais foram feitas coletando dois valores para

cada parâmetro de rugosidade Ra, Rq e Rz por quadrante, tendo-se um total de 96 dados por parâmetro e pá.

Depois de coletar os dados se observaram muitas semelhanças entre os dados coletados para as seis pás, assim se decidiu refazer a medição em duas pás na PC1 e na PV2 que foram escolhidas aleatoriamente para uma medição mais rica em dados. Tendo-se que se coletaram 10 dados por quadrante, dando um total de 480 pontos coletados por pá medida.

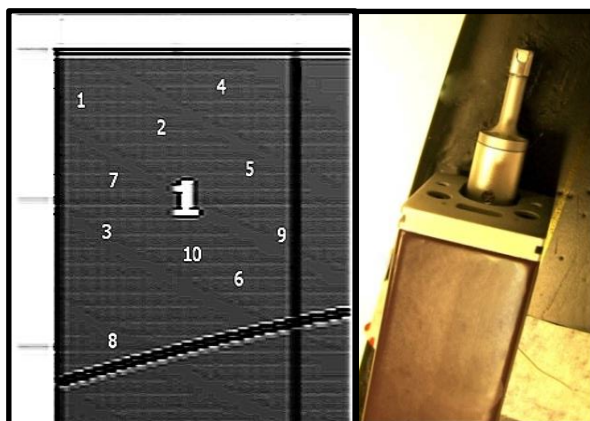


Figura 3.14- Ao lado esquerdo a representação dos pontos onde se fizeram as medidas, na direita uma fotografia do rugosímetro medindo os parâmetros de rugosidade em algum ponto da pá

3.4.2 Apresentação dos parâmetros Ra, Rq e Rz da rugosidade

Definiu-se como quadrante a união de quatro das partes das pás, assim as partes ‘1’ e ‘2’ do lado A foram juntadas as partes ‘1’ e ‘2’ do lado B, tal e como é apresentado na Figura 3.15. Esse passo é necessário para ter um número maior de dados a analisar, pelo que cada quadrante ficou com 40 pontos, tendo-se só 12 quadrantes ao em vez de 48 partes por pá.

Os resultados divididos por quadrantes permitem ter uma visão particular das pás, e encontrar possíveis defeitos. Ao ter feito a divisão os quadrantes 1-4 fazem parte do BA, os 5-8 ao PM e os 9-12 ao BF. Na Tabela 3.2, apresenta-se a nomenclatura usada para denominar os quadrantes, assim A1, M1, F1 pertencem ao tipo “1”, por exemplo.

Tabela 3.2- Tipos de quadrantes e regiões em que foram divididas as pás

Tipo de Quadrante	“1”	“2”	“3”	“4”
BA	BA1	BA2	BA3	BA4
PM	PM1	PM2	PM3	PM4
BF	BF1	BF2	BF3	BF4

Um estudo similar sobre rugosidade de pás compósitas, mas focado dum modo diferente foi feito por Felippes et al (2012) , sendo que as pás foram divididas em 24 quadrantes, e se fez uma análise geral por região. Onde os dados por quadrante são usados para encontrar as médias desses dados, para logo estimar as médias por região, para assim fazer uma avaliação das regiões BA, PM e BF. Convida-se ao sua leitura para complementariedade deste apartado.

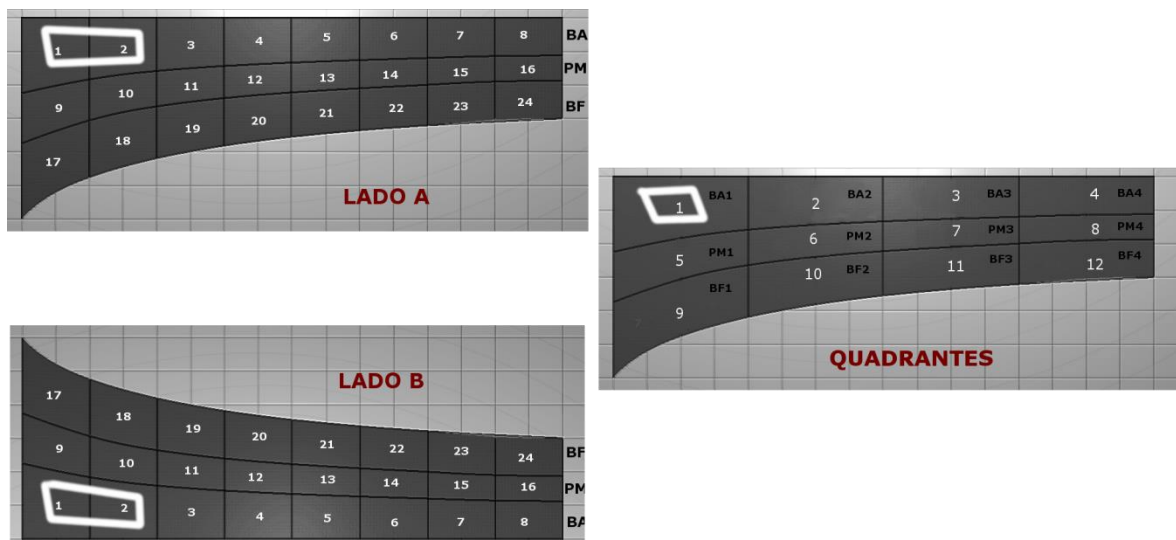


Figura 3.15- Partes e quadrantes nas pás

Como a média é um descritor estatístico que dá uma boa informação em populações simétricas, esse descritor pode não ser suficiente em várias situações. No caso da mediana ela ao estar à metade dos dados, pode dar mais informação de como estão distribuídos os valores para as grandezas da rugosidade nas pás.

E para evidenciar um comportamento, tal vez oculto, por os valores altos, decidiu-se fazer gráficas com as medianas dos valores nos quadrantes junto com as médias. Além, calcularam-se as médias da metade dos dados acima da mediana, assim como a média dos dados menores que ela, com o fim de observar a variabilidade dos dados, e comparar com o desvio padrão.

Para o cálculo das medianas, calcularam-se as medianas para os quatro quadrantes que fazem parte de cada região. Para depois, obter uma média dos valores, que foi a mediana usada para fazer os gráficos.

3.4.3 Métodos usados para analisar a rugosidade, médias e desvios padrões, teste de normalidade

Com esses dados, foram obtidas as médias e desvios padrões dos parâmetros de rugosidade. Além disso, fizeram-se histogramas de Ra, Rq, e Rz por perfil BA, PM e BF. Esses histogramas mostram as variações da rugosidade dependendo do setor da pá, assim como as diferenças existentes de rugosidade entre as pás. Depois, aplicou-se um teste de normalidade as pás com a seguinte Equação (3.1) (Box *et al.*, 1978):

$$p=(i - 0,5) * \frac{100}{N}, R = \bar{x} - x \quad (3.1)$$

Sendo a letra ‘N’ número de dados, ‘x’ os dados e ‘ \bar{x} ’ a média dos dados. Foi desenhado o gráfico de ‘p’ vs ‘R’ para todas as grandezas medidas da rugosidade e as duas pás.

3.4.4 Transformação dos dados da rugosidade, filtrado passa baixas, diferenciação estável

Foram feitos ajustes aos dados antes de transformá-los. Isto deve-se ao fato dos mesmos não terem um comportamento delimitado e contínuo quando são derivados. Foi definido um vetor com todos os dados, esse vetor foi dividido em intervalos desiguais, com essas correções foi possível à transformação. Essa organização, consistiu em dividir o vetor em cinco grupos com igual número de dados, assim cada grupo tem seu próprio desvio padrão (S) e tamanho de intervalo hS. Desta maneira foi escolhido um h=0,2, já que para

populações gaussianas se mantêm o valor do desvio padrão em um 99,7%, sendo usado aqui como referência unicamente (Behar *et al*, 2010).

Ao se agrupar os dados, consegue-se que eles possam ser representados por uma curva suave (que a derivada pode ser derivada várias vezes), que dá vantagens matemáticas (Behar *et al*, 2010). Como se obtêm intervalos com tamanhos diferentes pode-se ter um problema de interpretação o qual é solucionado dividindo as frequências absolutas entre o tamanho do intervalo, com o que se garante que as alturas das barras no histograma possam ser comparadas diretamente.

Com o ordenamento do vetor em intervalos de tamanhos diferentes, foi conseguido assegurar que a derivada do vetor não tivera mudanças grandes do valor e fora contínua, “suavizando a curva”, para logo aplicar um filtro passa baixa, que faz com que as mudanças de frequência bruscas não sejam permitidas. Os dados modificados foram apresentados junto com os originais para observar as diferenças e semelhanças entre eles.

Para fazer a transformação, foi aplicada a Equação (3.2) aos dados depois da modificação.

$$y^{(\lambda)} = \frac{y^{\lambda}-1}{\lambda y^{\lambda-1}} \quad (3.2)$$

Sendo lambda (λ) o fator de conversão escalar, y são os dados em forma de vetor, e $y^{(\lambda)}$ são os dados convertidos ordenados num vetor.

Como os dados modificados não são adequados para a aplicação da equação anterior, pois se encontram ordenados em dois vetores, um que contém a frequência em que aparece a média dos intervalos e no outro as médias desses intervalos, tal como está explicado no Apêndice 6.2 sobre esse assunto.

Então, faz-se o ordenamento dos dados modificados para aplicar a equação, primeiro se acham as frequências de $y(Fr)$, fazendo a contagem de quantos dados ficam por intervalo. E, em seguida, é usada a derivada de três pontos estáveis para os dados modificados, que tem como base a Equação (3.3):

$$\dot{Fr}(i) = \frac{Fr(i-1)[2x-R(i)-R(i+1)]}{[R(i-1)-R(i)][R(i-1)-R(i+1)]} + \frac{Fr(i)[2x-R(i-1)-R(i+1)]}{[R(i)-R(i-1)][R(i)-R(i+1)]} + \frac{Fr(i+1)[2x-R(i-1)-R(i)]}{[R(i+1)-R(i-1)][R(i+1)-R(i)]} \quad (3.3)$$

Onde, \dot{Fr} é a derivada da frequência de y , e x é a grandeza da rugosidade em intervalos não uniformes. Usando os dados obtidos se fez a transformação usando a Equação (3.2). Tendo-se os dados transformados, pode-se achar um intervalo de confiança desejado, como se se tratasse de uma população gaussiana.

3.5 ESTRATÉGIA E MEDIÇÃO DA GEOMETRIA

Para fazer a reconstrução da superfície das pás, foram coletados pontos com a MMC, para isso, foram marcados nove perfis transversais sobre cada pá, contendo 20 pontos cada um, sendo 10 em cada lado, como esquematizado na Figura 3.16, totalizando 180 pontos. A metodologia de escolher sempre a mesma quantidade de pontos por perfil é normalmente aplicada quando se usa medição com contato com máquinas de medir por coordenadas (Piratelli *et al.*, 2011).

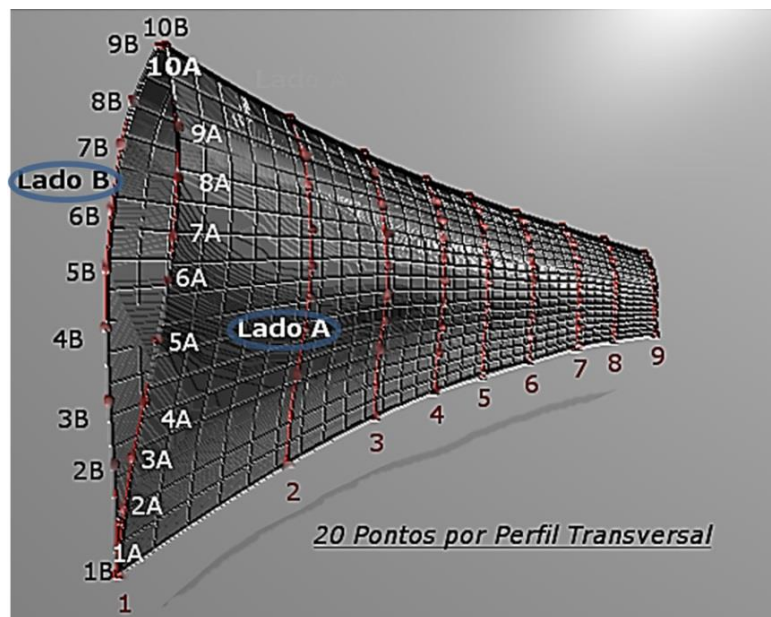


Figura 3.16- Representação dos pontos e perfis transversais

Para coletar os pontos dos nove perfis transversais, foi utilizado um apalpador de ponta seca (i.e. agulha) que é mostrado na Figura 3.17, cuidando que ela fosse colocada

perpendicularmente em relação à superfície da peça, a qual também está mostrado na figura, com o que se reduz o erro e a incerteza das coordenadas de cada ponto obtido.

O porquê de trabalhar com nove perfis está explicado detalhadamente no Apêndice 4, onde se descreve porque usar essa quantidade é uma opção adequada, pode-se ler ao final sem que por isso se perda generalidade da metodologia, além se teve em consideração o trabalho de Ordoñez (2012) que usa 168 pontos para reconstruir uma pá duma hélice, sendo que nesta pesquisa usou-se 180 pontos.

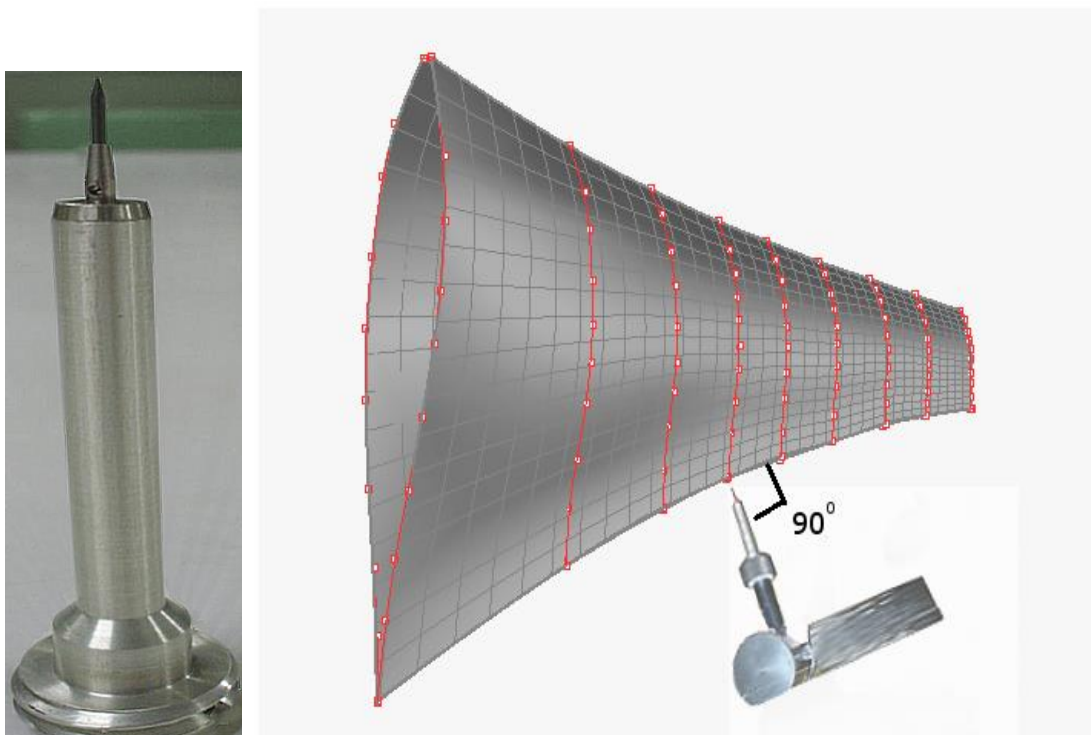


Figura 3.17- À esquerda foto da ponta seca, na direita a representação feita em *GIMP2* de como coletar os pontos das seções transversais na pá com a MMC

Os dados foram salvos em um arquivo de extensão *IGES*, o qual foi aberto usando o programa *Rhinoceros 5.0*. Na Figura 3.18, podem-se ver os pontos coletados desde *Rhinoceros 5.0*, e um perfil transversal com seus pontos.

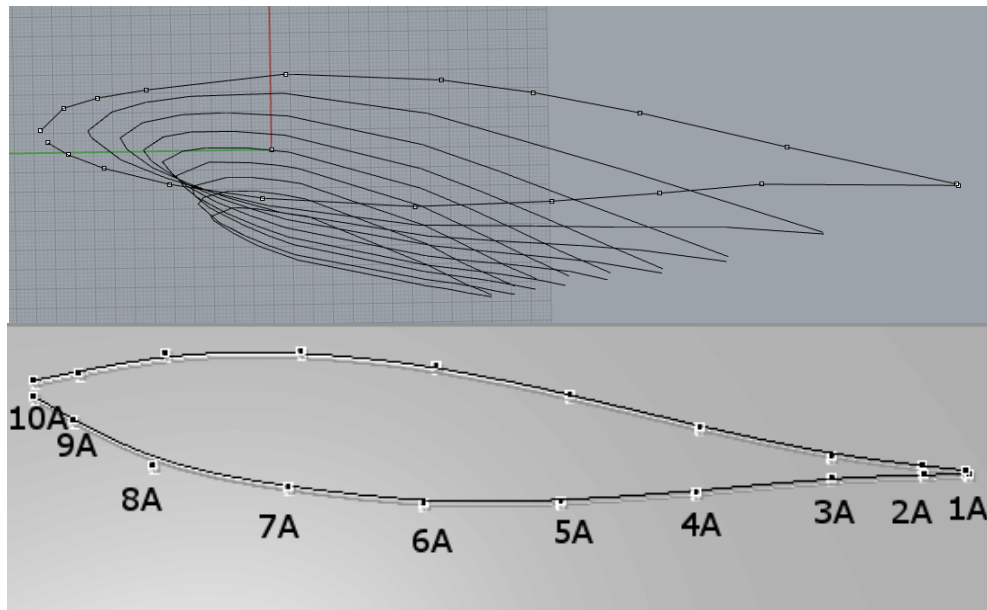


Figura 3.18- Acima, vista do arquivo *IGES* em *Rhinoceros 5.0*, em baixo pontos dum perfil transversal editado em *GIMP2*

Após a obtenção dos arquivos *IGES* para todas as pás com os resultados das medições na MMC, foram construídos os modelos *CAD* das peças. Essa fase foi feita com o programa *Rhinoceros 5.0* o qual permite construir superfícies de forma livre, além das superfícies regulares. As superfícies ajustadas são obtidas por aproximação e correspondem a modelos *NURBS*.

3.6 CONSTRUÇÃO DOS MODELOS *CAD*

A reconstrução das superfícies foi um dos passos mais importantes para fazer uma avaliação do processo de fabricação das pás, é em ele onde se obtém os dados para poder fazer uma comparação com o modelo GT. Para obter um método que fosse adequado se fez uma análise que se amostram no Apêndice3 onde se expõe em detalhe o processo levado a cabo para chegar ao método exposto nesta seção e que aqui prejudicaria a continuidade. A continuação se explicam os passos para fazer os modelos das superfícies em *Rhinoceros 5.0*, e na Figura. 3.19:

1. Foram coletados os pontos com o braço MMC articulado para medir coordenadas. Foram salvados os pontos em um arquivo IGS, abre-se o arquivo com *Rhinoceros* 5.0.
2. Com os pontos coletados da MMC fazer curvas do tipo “*control point curve*” que permitem fazer uma curva do tipo forma livre.
3. Essas curvas são reconstruídas para que a superfície fique uniforme, escrevendo no “*command*” “*rebuild*” e logo 20 e 3, para indicar que a curva terá vinte pontos de controle e que elas serão de terceiro grau. Na Figura 3.19 apresenta-se uma vista dos passos do 1 ao 3.

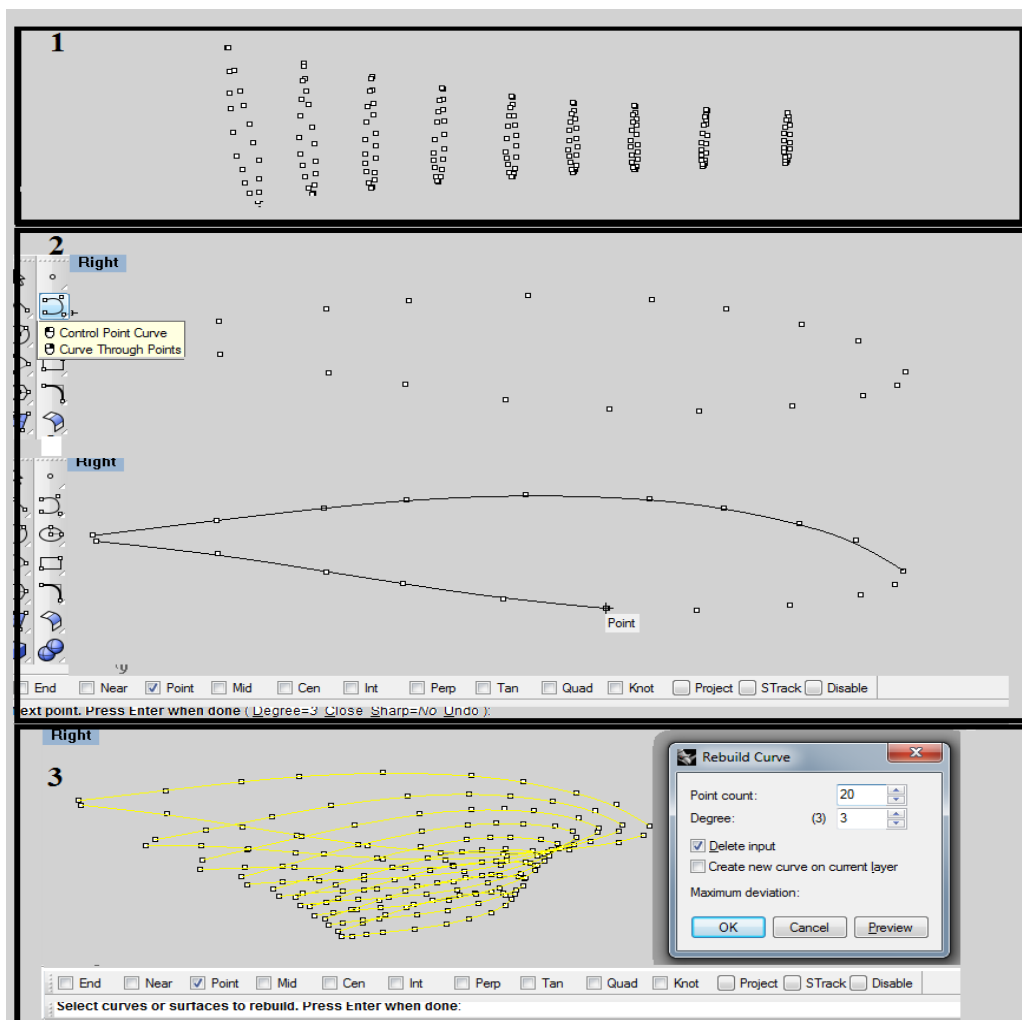


Figura 3.19 Construindo os perfis transversais a partir dos pontos coletados com a MMC, passos do um ao três

- Com as curvas foi construída a superfície por cada lado lateral, tal como mostra a Figura 3.20, usando o comando “loft”, depois de construir cada superfície reconstruir a superfícies criadas com 30 pontos U e 20 pontos V, usando o comando “rebuild”.
- Foram construídos dos planos “a” e “b” com os pontos das seções finais do modelo da pá, com o menu *Surface/Plane/Through Points*, como se mostra na Figura 3.20.

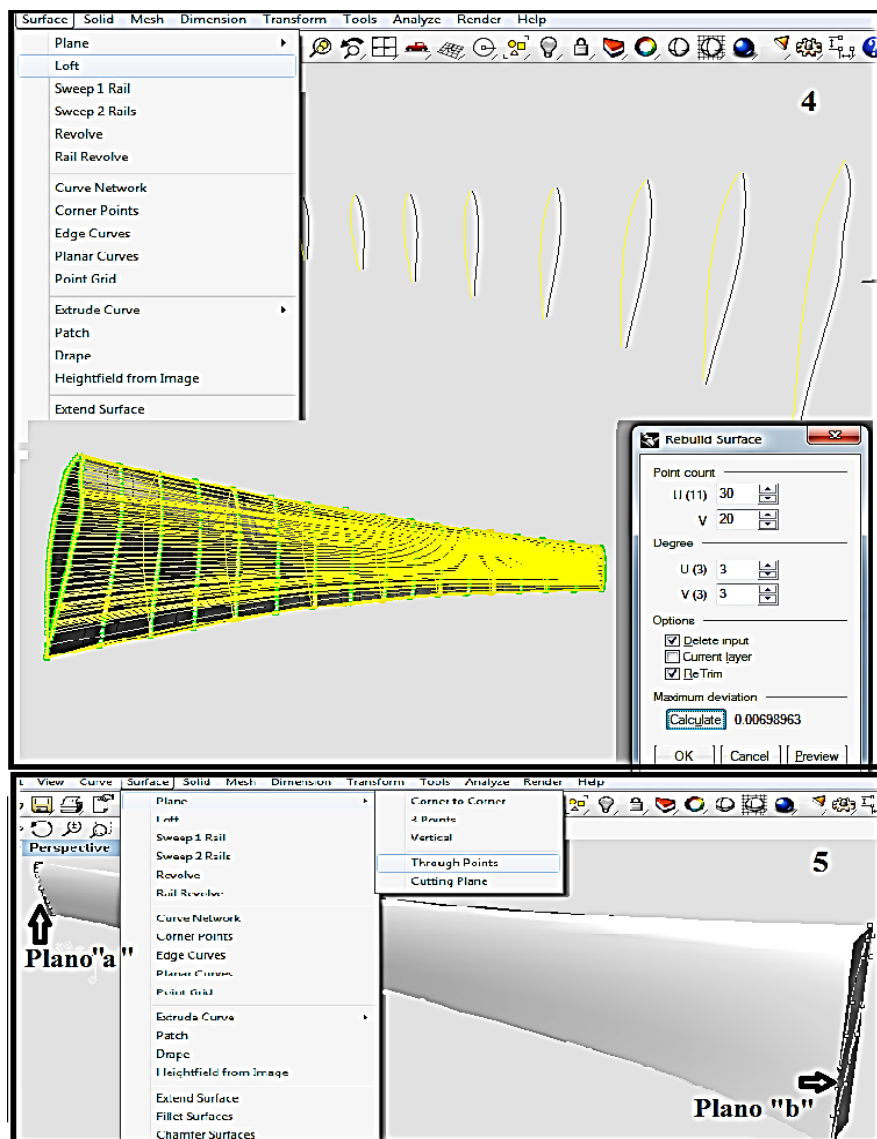


Figura 3.20- Passos quatro e cinco para a reconstrução da superfície da pá e fazem-se os planos “a” e “b” com os pontos finais das seções transversais

- Movimentar os planos até o ponto final que serviu de referência, estender os planos e as superfícies da pá de tal forma que as bordas destas superfícies fiquem atravessando os planos, como se mostra na Figura 3.21.

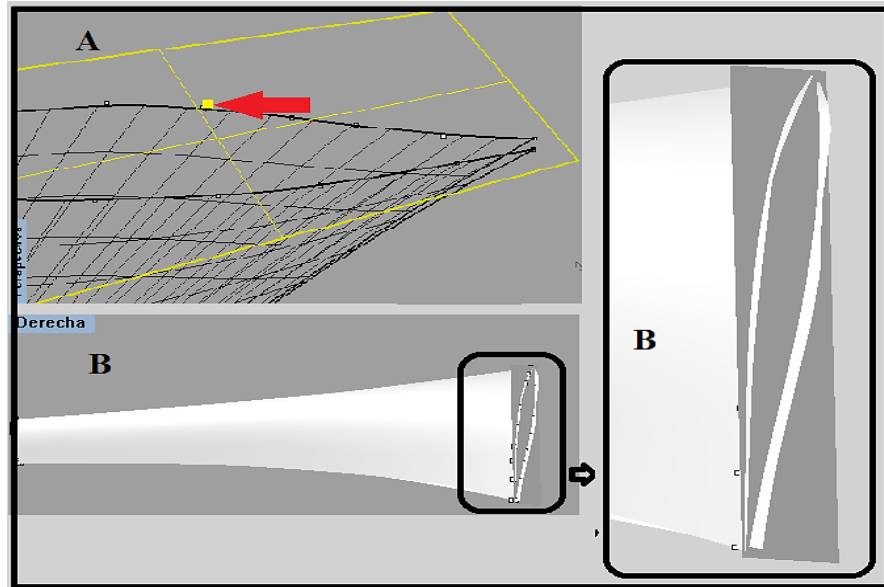


Figura 3.21- Movimentando os planos, A) O plano é movimentado até o ponto final e B) a superfície é estendida até que corte tudo o plano

- Foi apagada a superfície em destaque com respeito aos planos, usando “*Split*”, ver Figura 3.22.

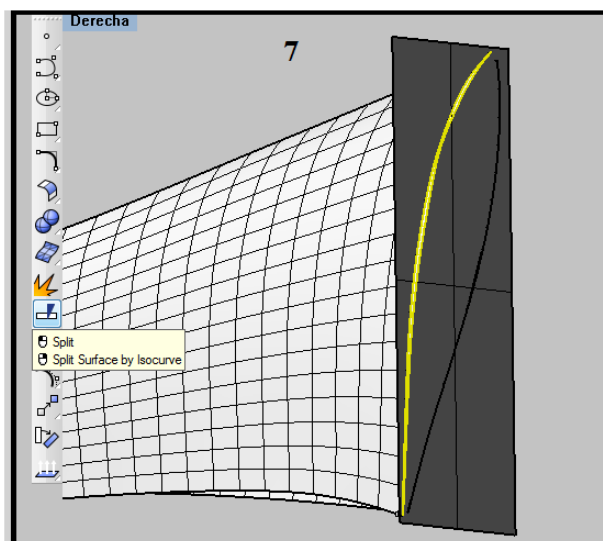


Figura 3.22 - Recortando a superfície em destaque

8. Fazer o cálculo da distância dos pontos à superfície com o menu “*Analyze/Surface/Point Set Deviation*”, na janela que abre *Point/SurfaceDeviation* na caixa “*Bad Point*” preencher com 0,3 e na caixa “*Ignore*” colocar um valor perto de 0,6 que faça com que o número de pontos tidos em conta na análise (“*point count*”) seja 176, tal como se apresenta na Figura 3.23.

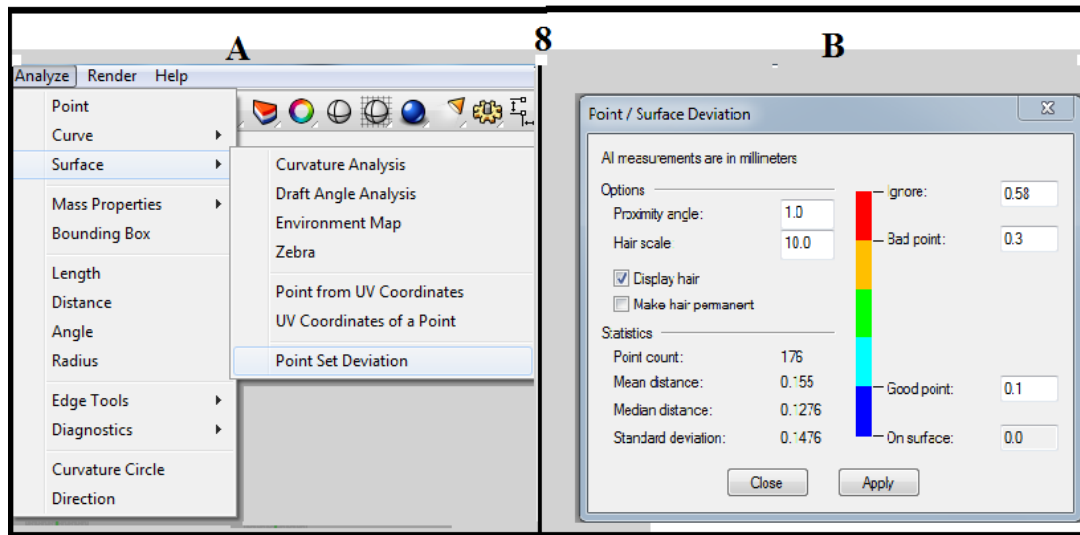


Figura 3.23 - Assignando parâmetros para o análise

3.6.1 Método para comparação dos modelos das pás compósitas com o modelo *GT* das pás

No caso da avaliação do conformado geométrico foi feito um método próprio para fazer a comparação entre as diferentes pás, na procura de achar os parâmetros adequados para apresentar semelhanças e diferenças entre as pás.

1. Abrindo os dois modelos na mesma janela, se entre ao arquivo onde está *GT*, depois com o menu “*File/Import*” se acede ao modelo que se quer comparar com *GT*, ver Figura 3.24.
2. Encontrando os centros de área da parte baixa e alta dos modelos *GT* e da pá a comparar, usando-se o menu “*Analyze/Mass Properties/AreaCentroid*”, ver Figura 3.25.

3. Foram colocados os modelos de tal forma que o centro de área das bases encaixe, usando o ícone chamado “*Move*”, ver Figura 3.25.

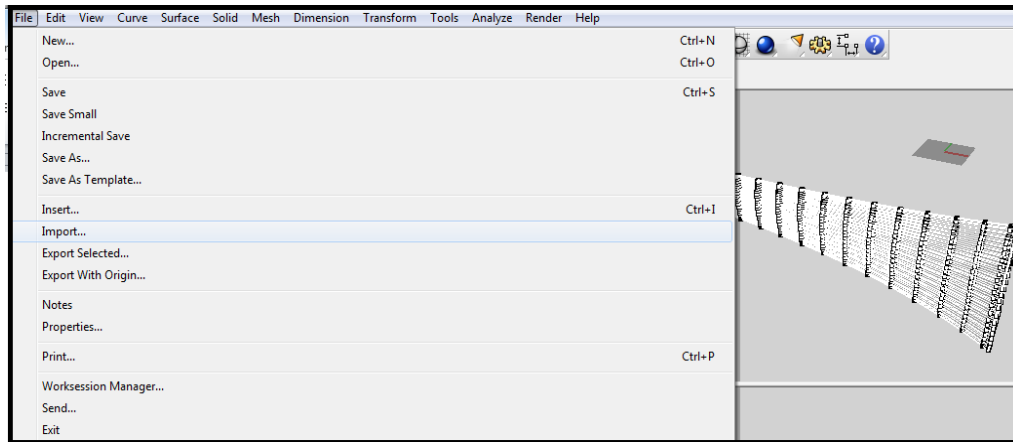


Figura 3.24- Passo um do método de comparação com *GT*

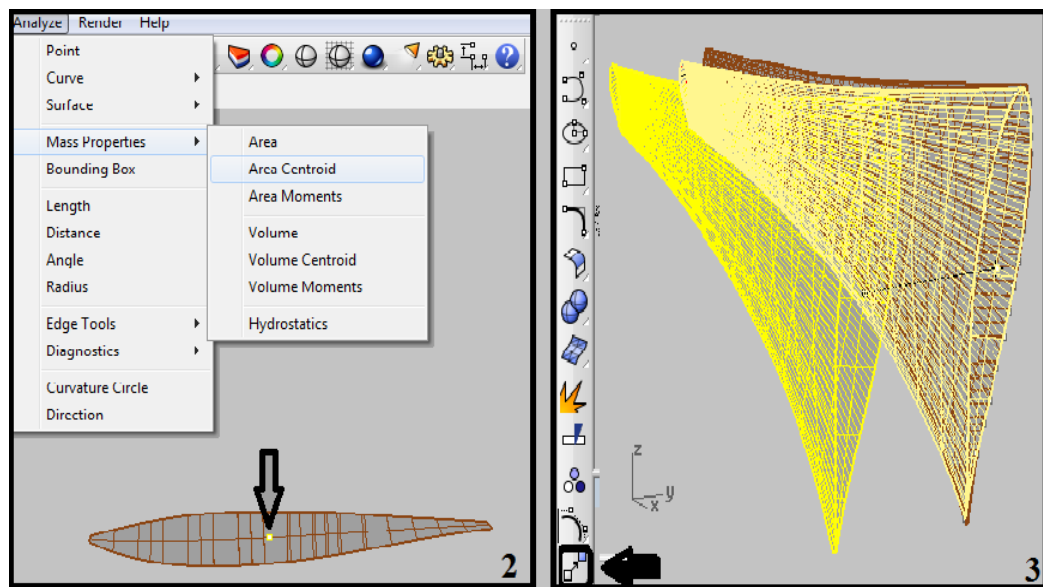


Figura 3.25- Passos dois e três do método

4. Faz-se uma linha reta para cada modelo, entre os centroides da base e da parte alta do modelo, ver Figura 3.26.
5. Mede-se o ângulo entre as linhas, com o menu “*Dimension/Angle Dimension*”, ver Figura 3.26.

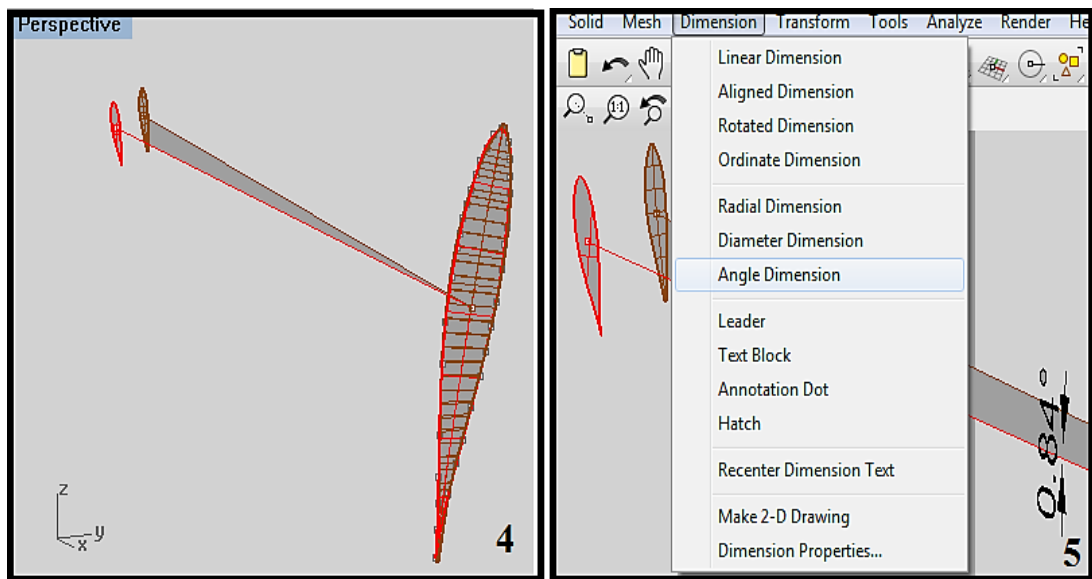


Figura 3.26- Passos quatro e cinco do método

3.6.2 Método para comparar os perfis de cada modelo das pás compósitas com os do modelo GT

Tendo os modelos das pás, e ao fazer uma comparação deles com o modelo *GT*, houve um problema no ajuste das superfícies. Os modelos não “encaixaram”, devido a uma natureza diferente entre os modelos por deformações de um modelo em relação ao outro. Assim, foi proposto fazer rotações e translações no modelo por seção e não simplesmente no modelo inteiro. Tais ajustes permitem a comparação dos perfis. O método é o seguinte:

1. Achando os centros de área da base dos modelos, do modelo *GT* e do modelo da pá a comparar, usando-se o menu “*Analyze/Mass Properties/AreaCentroid*”. Colocam-se os modelos de tal jeito que o centro de área das bases encaixe, usando o ícone chamado “*Move*”, da mesma forma como se vê na Figura 3.25, apresentada para os passos dois e três da seção anterior.
2. O modelo da pá se divide em 10 setores, cortando o modelo com planos. Usando o Menu “*Surface/Plane/Vertical*” para criar um plano, e o ícone “*Copy*” para ir colocando 10 planos extra, ver Figura 3.27.

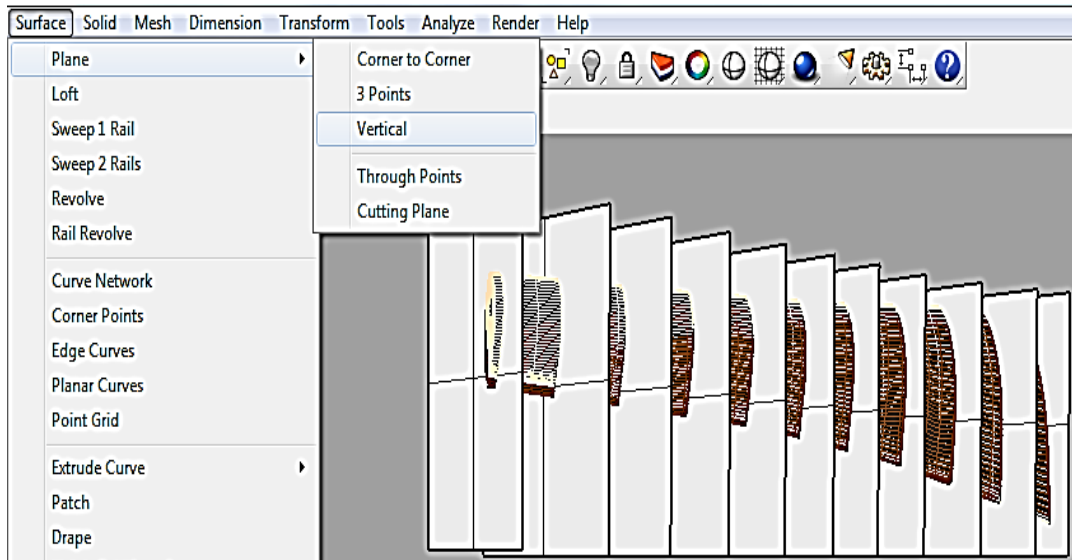


Figura 3.27- Passo dois para fazer a comparação dos perfis com o GT

3. Foi cortado o modelo em 10 partes com o ícone “*Split*” selecionando o modelo da pá e depois os 11 planos. Esconde-se o modelo GT com o ícone “*HideObjects*”.
4. Projetando em cada plano as curvas dos perfis transversais, com “*Project toSurface*”. Na medida em que se vão projetando as curvas, se escondem os setores usados com “*HideObjects*” e se bloqueiam as curvas projetadas com “*LockObjects*”.

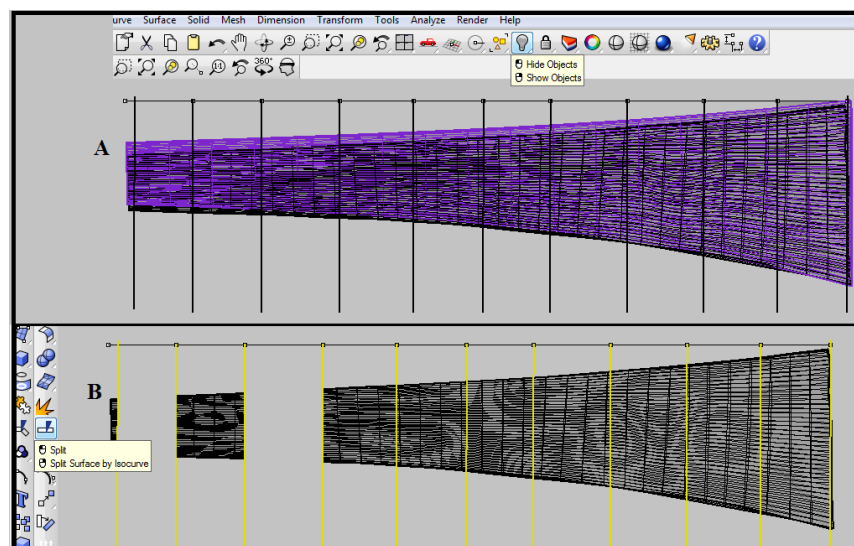


Figura 3.28-Passo três para fazer a comparação dos perfis com o GT

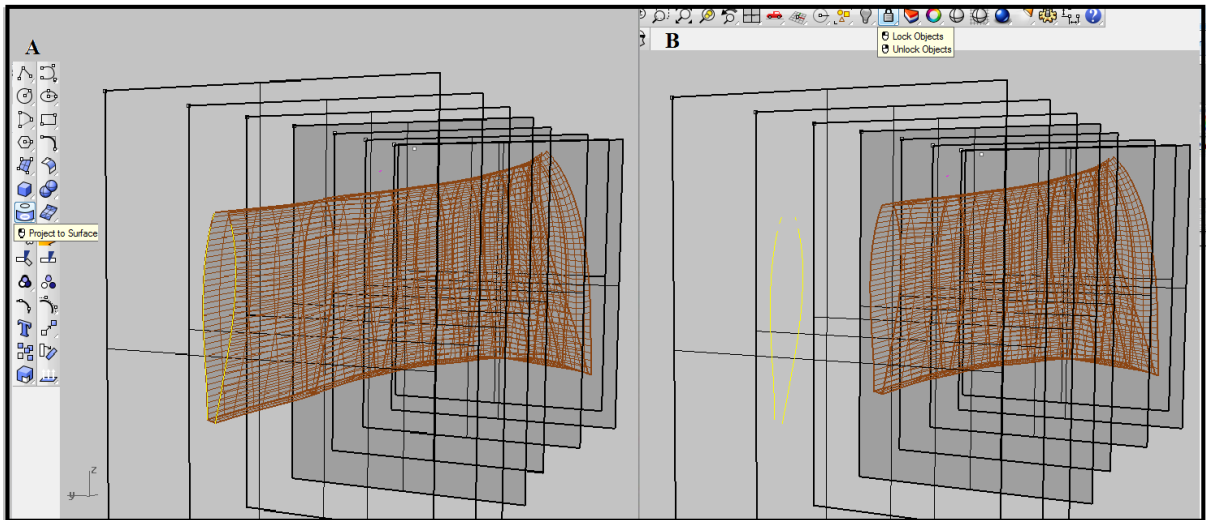


Figura 3.29-Passo quatro para fazer a comparação dos perfis com o GT

5. Mostrando o modelo GT, mantendo o click em “*Hideobjects*” e dando click no modelo GT, se repete o passo quatro com o modelo GT.

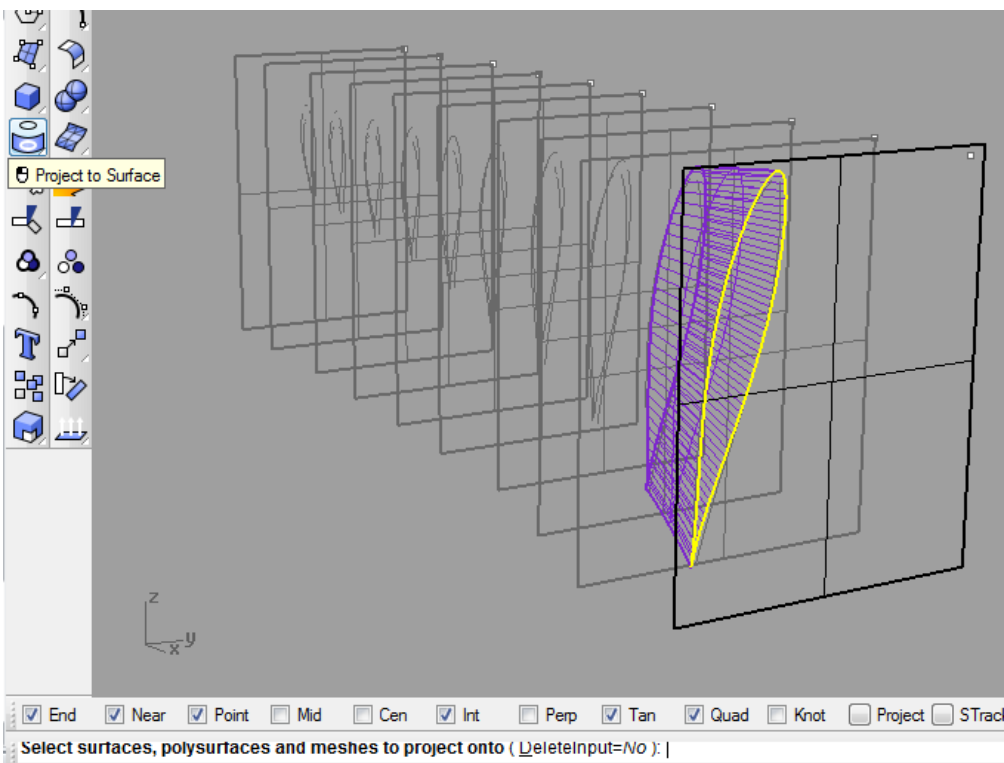


Figura 3.30- Passo cinco para fazer a comparação dos perfis com o GT

6. Rotando e trasladando os perfis obtidos no modelo da pá de tal modo que se ajustem aos perfis obtidos com GT, com “*Move*” e “*Rotate 2-D*”. Na medida em que se vão

ajustando um perfil, se apagam as curvas do modelo GT e se bloqueiam as curvas do modelo da pá com “BlockObjects”.

7. Reconstruindo as curvas obtidas a curvas de terceiro grau e 20 pontos de controle, com o comando “Rebuild”, escrevendo na “caixa” “Point count” o numero “20” e em “Degree” o numero “3”. Modelar-se a superfície da pá a compara de novo usando os novos perfis, no menu “Surface/Loft” escolhendo primeiro todas as curvas dum lado e depois usando de novo o mesmo recurso as outras curvas. Logo se reconstruí a superfície obtida.

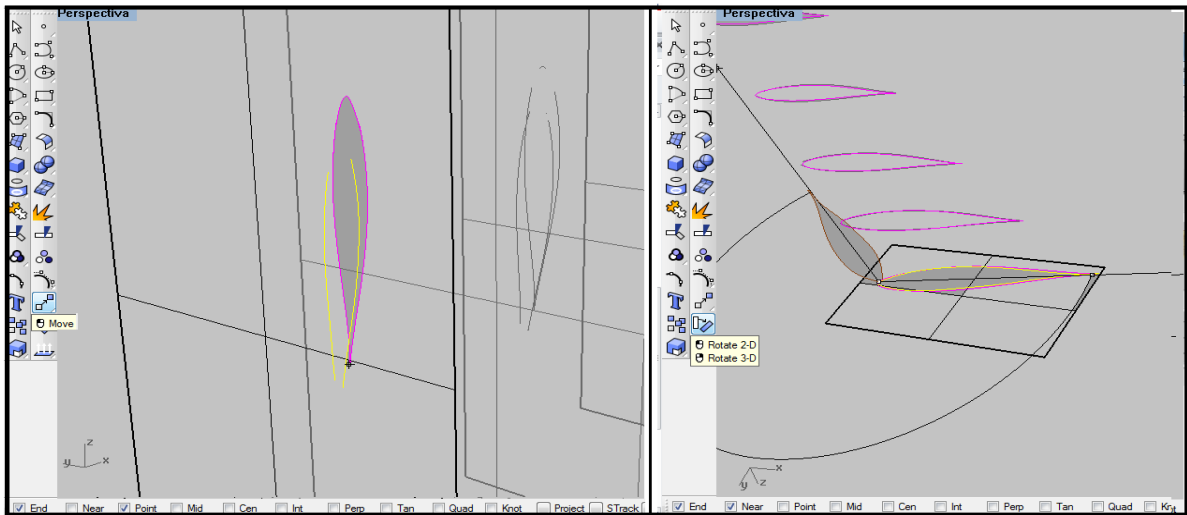


Figura 3.31-Passo seis para fazer a comparação dos perfis com o GT

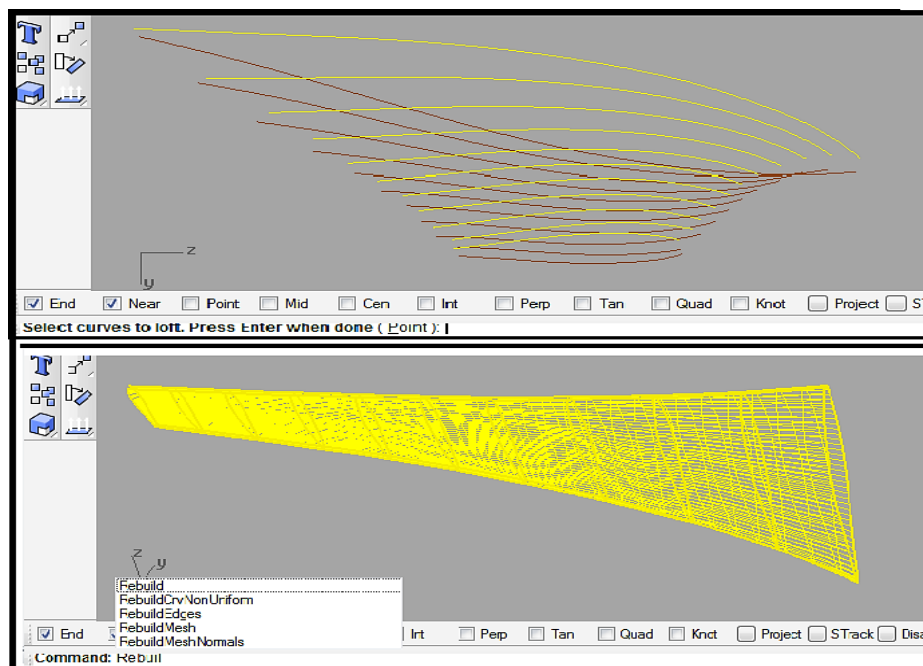


Figura 3.32- Passo sete para fazer a comparação dos perfis com o GT

8. Obtendo os pontos da superfície do modelo recém-construído, mantendo o click apertado em “Point” e logo dando click em “*Extract Points*”. Depois, bloqueia-se o modelo, usando “*BlockObjects*”. Logo se analisa a superfície de GT com os pontos obtidos do modelo da pá, usando o menu “*Analyze/Surface/Point Set Deviation*”. Na janela “*Point/SurfaceDeviation*” se se preenche na caixa “*Bad Point*” com o numero “2”, e em “*Ignore*” com um número maior que “2” que faz com que “*Point Count*” seja 1490.

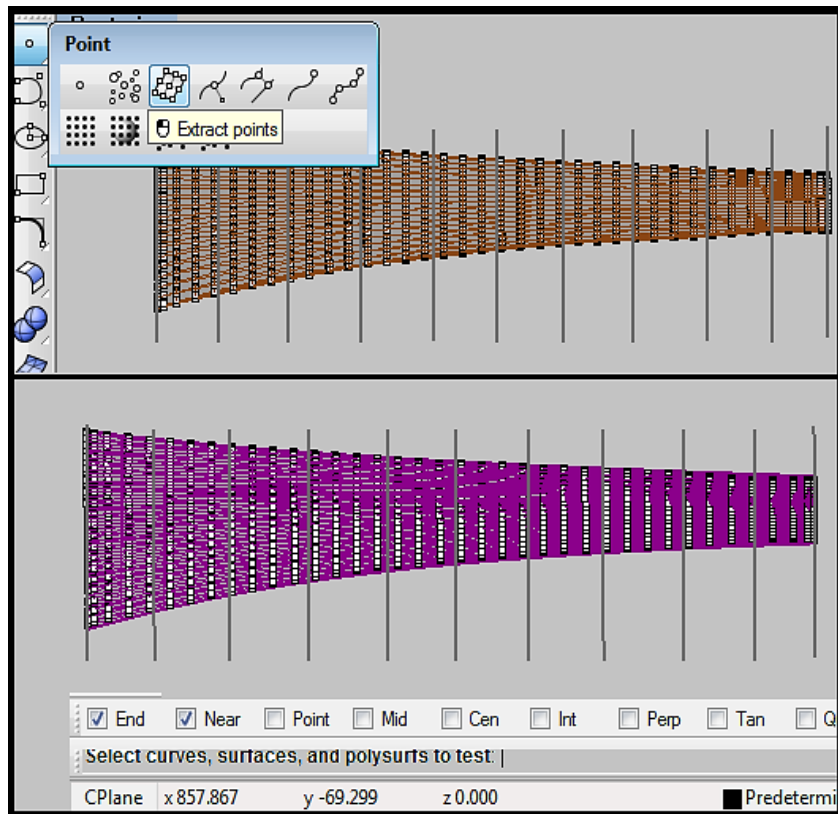


Figura 3.33-Passo oito para fazer a comparação dos perfis com o GT

3.7 DETERMINAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO MÓDULO DE ELASTICIDADE (E) DAS PÁS COMPÓSITAS

Para determinar o módulo de elasticidade, foi usado um método teórico-experimental, que consistiu em achar as deflexões nas pás para massas conhecidas experimentais, fixadas na extremidade livre das pás. Usaram-se esses dados para encontrar os módulos elásticos utilizando simulações e aplicando na pá (com um modelo geométrico simplificado), o

método de áreas para vigas engastadas, com carga na extremidade livre, conforme apresentado na Figura 3.34.

Como primeiro passo encontrou-se o quanto as pás defletiam por causa da haste de alumínio (tubo fixado no interior das pás, com trecho externo designado haste), para várias massas conhecidas, esse valor foi subtraído das deflexões experimentais, para depois ser usadas nas simulações e nos cálculos pelo o método de áreas. Para as simulações inseriram-se o modelo geométrico (modelo CAD, espessura) e propriedades dos materiais (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento) num modelo em ANSYS para assim achar os módulos elásticos segundo cada massa.

No caso do cálculo simplificado pelo método de áreas, usaram-se as deflexões verticais, sem ter em conta a haste de alumínio no trecho inicial das pás. Além, para o cálculo o modelo CAD das pás foi simplificado a um onde as seções transversais foram elipses, com a mesma área transversal das pás.

Para achar as deflexões fez-se uma montagem experimental (ver Figura 3.34), na qual as cargas verticais na extremidade livre são produzidas com massas conhecidas. Usou-se a hipótese de que no intervalo de trabalho, tem-se um comportamento linear, assim os dados cumprem a Equação (3.4) da linha reta.

$$P_{exp} = m \cdot \delta_{exp} + b \quad (3.4)$$

Onde ' P_{exp} ' é a carga experimental na ponta da pá, ' δ_{exp} ' a deflexão experimental da extremidade livre, sofrida pela pá, ' b ' é a ordenada, ' m ' a tangente da reta.

Como o módulo elástico (E) pode ser expresso pela equação (3.5), equação diferencial de uma viga engastada em uma extremidade e livre na outra ("cantilever"), pode-se achar uma relação entre ' m ' e ' E ', para cada grupo de pás.

$$E \cdot I \frac{d^2\delta}{dx^2} = -P \cdot x \quad (3.5)$$

Sendo ' E ' o módulo elástico, ' I ' o momento de inercia, ' x ' a distância do engaste até a carga, ' P ' é carga teórica, ' δ ' é o valor teórico da deflexão da pá. Ao se integrar duas

vezes a equação (3.5) e reorganizando obtêm-se:

$$E \cdot g(I) \cdot \delta = P \cdot f(x) , \quad \text{reorganizando:}$$

$$P = [h(I, x) \cdot E] \cdot \delta \quad (3.6)$$

Onde ‘h’ é uma função da geometria e da distância na qual se aplica a carga, ‘E’ é o módulo elástico e ‘ δ ’ é a deflexão vertical sofrida pela extremidade livre das pá. Deste modo, tem-se um critério para achar-se o valor de ‘h’ a partir de ‘m’ e ‘E’. Sendo que o valor de ‘h’ tem dois valores: um para as PCs; e outro para as PVs, devido ao fato de que a espessura em cada grupo difere. Desta maneira, foram colocadas as tangentes em função dos dados experimentais com os valores dos módulos encontrados.

3.7.1 Preparação das pás para a medição das deflexões

As pás foram fixadas (engastadas) na base com uma prensa tipo morsa e submetidas a cargas concentradas conhecidas na extremidade. As deflexões obtidas foram medidas com um calibrador traçador de altura. A prensa tipo morsa foi fixada a uma plataforma metálica, a qual por sua vez esteve fixada a uma mesa, mediante de duas prensas tipo sargento, como se pode ver na Figura 3.34. Onde “a” é a prensa tipo morsa, “b” as prensas tipo sargento, “c” a plataforma, “d” a pá, “e” é um dispositivo que evitar a torção da pá e “f” o calibrador. O dispositivo foi fabricado no laboratório de mecânica da UnB, as medições foram feitas no laboratório de metrologia dinâmica da UnB.

Fizeram-se quatro medições das massas do dispositivo e dos discos numa balança digital marca MITUTOYO, com uma capacidade de medir até um centésimo de grama. Na tabela 3.2, tem-se os valores médios das massas. Na Figura 3.34, mostram-se os discos usados para produzir as deflexões nas pás.

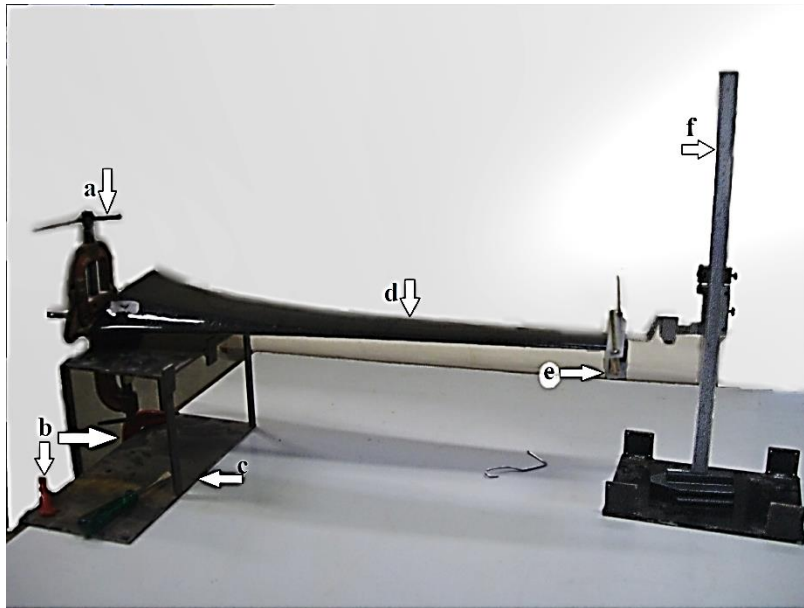


Figura 3.34- Montagem para fazer as medições de deflexão

Tabela 3.2 - Massas usadas para defletir as pás

	Massas (gramas)
Dispositivo antitorção	156,23
Disco 1	222,00
Disco 2	220,02
Disco3	219,71
Disco 4	219,90
Disco 5	221,19



Figura 3.35- Discos usados para defletir as pás

3.7.2 Medição das deflexões verticais e cálculo do módulo elástico

Para fazer as medições, seguiu-se a seguinte estratégia:

- Mediu-se como ponto de referência a pá sem nenhuma carga extra (0 kg).
- Colocou-se o dispositivo antitorção, e mediu-se de novo (massa diferente de zero).
- Em seguida se foram adicionando os discos um por um, enquanto se iam fazendo as medições, ver Figura 3.36. Ao terminar, se foram retirando os discos um por um, não sem antes fazer uma medição.
- Por último se retirou o dispositivo, fez-se a última medida (medida sem carga).

Esse processo foi repetido três vezes, para cada pá. Obtendo-se, desse modo seis pontos por peso e pá, um pelo dispositivo e cinco pelas massas. Teve-se cuidado de colocar sempre os discos na mesma ordem. Isto para garantir a uniformidade das medidas devido a que os discos ainda que tenham as mesmas características, não são idênticos, podendo ocasionar erros devido aos pequenos câmbios de massa.

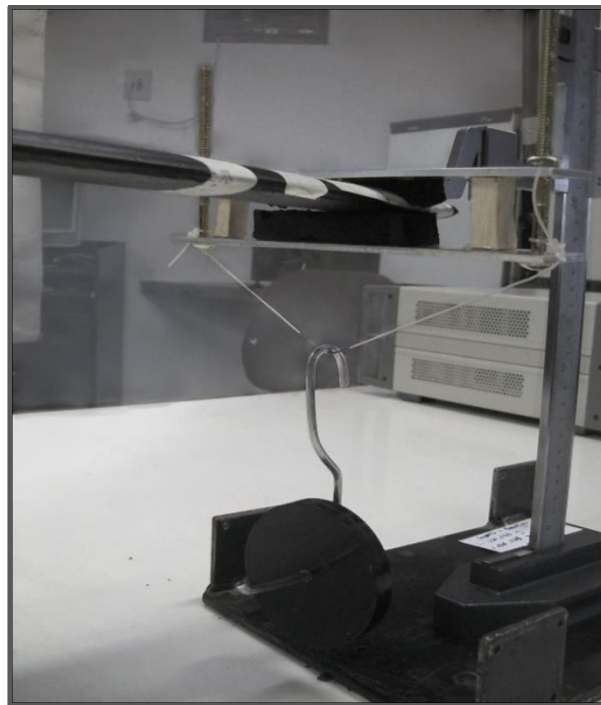


Figura 3.36- Medição da deflexão da pá com o disco 1 e o dispositivo

Tendo-se em mente, que o intercepto pode ser visto com um erro sistemático, ver Baird (1995), mas não necessariamente instrumental e se por alguma tendência do mesmo experimento. Assim se a hipótese do erro sistemático é verdadeira, pode-se supor que $P_{exp} = P + \varepsilon_{p_sist}$ e $\delta_{exp} = \delta + \varepsilon_{d_sist}$, onde ε_{p_sist} e ε_{d_sist} são erros sistemáticos no processo das medições das massas e das deflexões respectivamente. A Equação (3.4), pode ser escrita como a Equação (3.7):

$$P_{exp} = m \cdot (\delta + \varepsilon_{d_sist}) - b \quad (3.7)$$

Agora bem, como para medir as massas o processo é bastante simples ao comparar-se com o de medir as deflexões e supondo uma boa calibração nas balanças, pode-se inferir que o erro nas cargas é muito pequeno se comparado às deflexões, pelo que $P_{exp} = P$. Assim, quando se comparam as Equações (3.5) e (3.6) obtêm-se as seguintes relações:

$$b = m \cdot \varepsilon_{d_sist} \quad (3.8)$$

$$P = m \cdot \delta \quad (3.9)$$

$$\delta = \delta_{exp} - \varepsilon_{d_sist} \quad (3.10)$$

Na equação (3.9) corrigem-se os valores da deflexão, que permite obter um valor do módulo elástico mais próximo do real.

Depois de obter as deflexões corrigidas, calcula-se a média usando os valores nas três pás e esses valores são usados para calcular os módulos elásticos mediante os dois métodos.

3.7.3 Modelo estático para aplicar o método dos momentos de áreas, método 1

Ao se medir e calcular as grandezas dimensionais do perfil NACA 63-215, encontrou-se que esse perfil tem as seguintes características geométricas importantes para esta pesquisa.

- $\frac{D}{d} = 6,7$
- A área para um perfil de comprimento maior (D) unitário, de unidades arbitrárias, é $9,4 \times 10^{-3}$.

- A área do perfil pode ser expressa em função do comprimento menor (d), assim:
 $A = Kd^2$, Sendo $K= 4,2$ para esse perfil, como será visto na frente esse valor independe do tamanho do perfil.

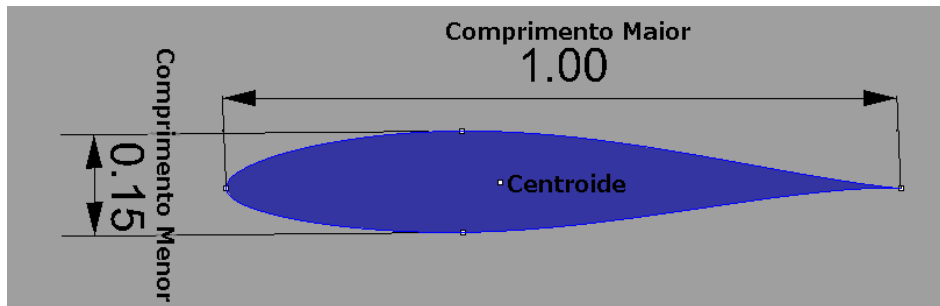


Figura 3.37- Comprimentos no Perfil NACA 63-215

Ao aproximar esse perfil mediante elipses como se apresenta na Figura 3.38, têm-se como variáveis fixadas a área e o comprimento menor. Isto devido a que para o calculo das deflexões esses parâmetros têm maior peso do que o comprimento maior.

Assim, calcula-se uma elipse que compartilhe o centroide com o perfil, além de ter a mesma área e comprimento menor. Como se pode observar na Figura 3.38, é preciso que o diâmetro maior da elipse seja um pouco menor (20% para este caso) para conseguir obter a mesma área.

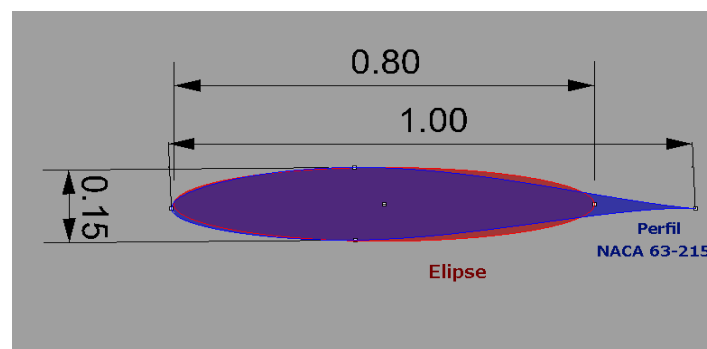


Figura 3.38- Comparação entre o perfil NACA 63-215 e uma elipse de igual área e altura

Depois de obter assim as elipses para as PCs e PVs em várias posições da pá, reconstrói-se uma nova pá, aqui denominada pá elíptica, PE. Com ela se fizeram os cálculos teóricos usando a técnica das áreas para vigas com engaste com diferentes momentos de inercia. A

pá GT e a pá reconstruída em *Rhinoceros 5.0* usando o método descrito, que se apresenta na Figura 3.39.

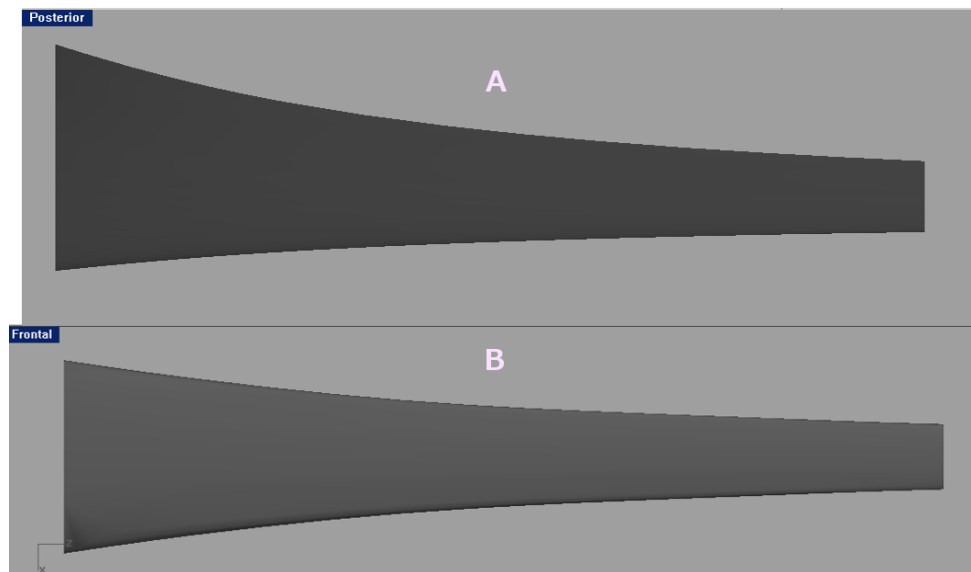


Figura 3.39- Comparação entre GT e PE, acima GT, embaixo PE

Sendo que o desenho ‘A’ é a pá GT enquanto ‘B’ é a pá PE. As duas pás compartilham os valores das áreas e alturas nos perfis transversais, além de ter o mesmo comprimento total.

Considerando as relações anteriores e aplicando o método dos momentos de áreas, calculou-se analiticamente a pá. Seguiram-se as seguintes considerações e hipóteses para fazê-lo:

- Os comprimentos das seções transversais seguem a seguinte relação:

$$D_p = 6,7 \times d_p$$

- Enquanto as áreas transversais das pás seguem a expressão,

$$A_{tp} = 4,2 \times d_p^2$$

- Considerou-se que as seções transversais das pás podiam aproximar-se por segmentos transversais elípticos.

- Impôs-se que o diâmetro maior (D) da elipse é função linear do diâmetro menor (d) da mesma.
- Que o aporte na inércia de D_p é pequeno em relação ao de d_p .
- Impôs-se que A_{tp} e d_p são iguais aos suas equivalências na elipse.
- Para calcular-se o módulo elástico efetivo, faz-se uma aproximação adicional, a PE, se visualiza como uma pá conformada de vários cilindros elípticos com a área média entre perfis como se observa na Figura 3.40. A pá conformada de cilindros foi denominada, PCE.
- Teve-se em conta a haste de alumínio, e se descontou o valor que aporta na deflexão.
- A haste de alumínio tem um módulo de $7,1 \times 10^{11} Pa$, a seção transversais são circulares e tem uma espessura de aproximadamente 1 mm, com diâmetro externo de 12,6 mm e uma distância da base a onde foi presa à haste de 10 mm aproximadamente.

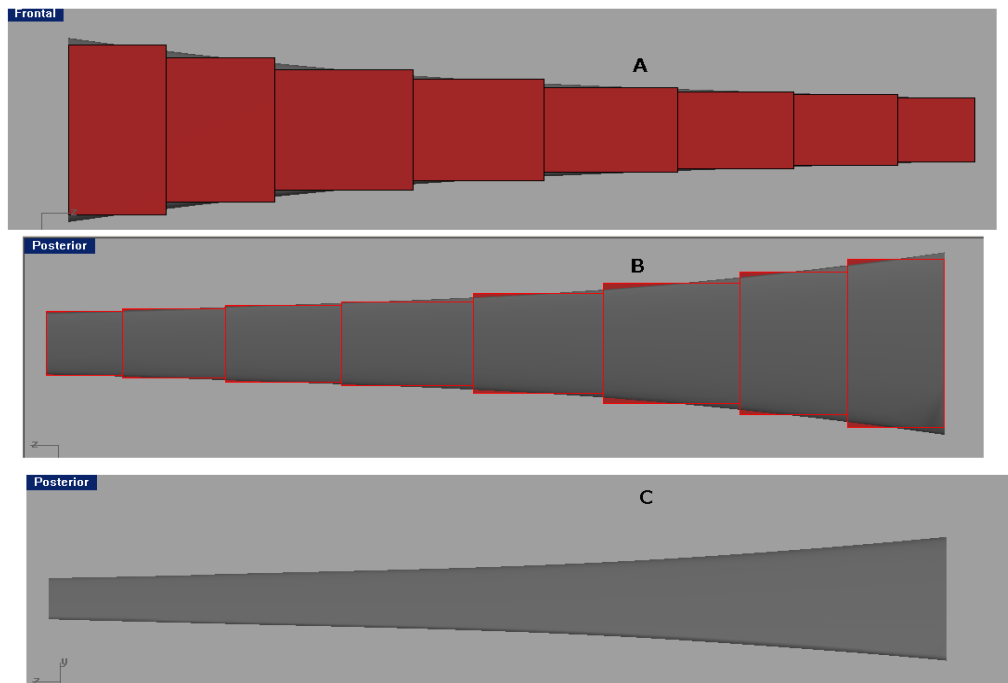


Figura 3.40- Diferentes vistas de PE e PCE, em cor cinza PE e em vermelho PCE.

- No cálculo do módulo, usaram-se os valores médios das deflexões experimentais para uma carga de 1,26 Kg, o carregamento (P) usado para achar os módulos foi é de 12,315N (1,26Kg).
- Fez-se se os cálculos dos módulos utilizando o método de áreas para uma viga engastada, programando em *Matlab 2012* um programa que tivera em conta os passos e dados anteriores.

3.7.4 Medição das deflexões e cálculo do módulo elástico, Método 2

Finalmente, calculam-se os módulos elásticos para as pás, fazendo simulações com *ANSYS 14.5* para comparar os do módulo de elasticidade calculados pelo método 1.

Para fazer as simulações, se tiveram em conta os seguintes passos:

- Primeiro se ajustaram os modelos geométricos para ser usado no programa *ANSYS 14.5*, tirando informação geométrica do modelo CAD, se fez uma reconstrução com um menor numero de pontos da superfície com a finalidade de deixar mais leve o processamento.
- Colocou-se a informação da espessura e materiais, assim como um valor inicial para o módulo de elasticidade.
- Suavizou-se a borda de fuga, fazendo um arredondamento de 1 mm para que a geometria fora aceitável para simulação, devido a que quando se têm bordas muito finas é mais difícil obter boas malhas dos objetos.
- Fez-se a malha do modelo com o numero adequados de elementos, indicado pelo quantos elementos tem uma qualidade superior a 60. Esse fator é um indicativo da qualidade das formas geométricas que representam o objeto, pelo que também o são da qualidade da malha.
- Introduziram-se restrições de mobilidade no modelo, fixou-se a pá a través da base.

- Colocou-se uma das massas para provocar a deflexão, no caso do estudo foi escolhida a massa de 1,26 Kg que foi a maior massa usada nesta pesquisa.
- Rodou-se o modelo, obtendo-se um valor de deflexão para a pá. Esse valor é comparado com o medido experimentalmente para ajustar o módulo de elasticidade no modelo, até que a deflexão na simulação fora igual até no $1 \times 10^{-5}m$.

Os modelos estáticos têm menor informação da geometria do que os modelos geométricos CAD, já que as simulações impedem ter tal qualidade, por exceder a memória no processo, além de não implicar num deterioro dos cálculos.

4 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS SOBRE A RUGOSIDADE

Como foi mencionado na metodologia, foram feitas medições dos parâmetros de rugosidade sobre as pás, iniciando-se com a obtenção do comprimento de amostragem (“*cut-off*”) adequado para fazer as medições dos parâmetros Ra, Rq e Rz. Estes parâmetros representam as rugosidades médias: aritmética; quadrática; e a obtida dos cinco maiores picos e vales, respectivamente. Os resultados destes valores, bem como o teste para a normalidade dos dados são mostrados em histogramas por quadrantes, nas regiões de bordo ataque, BA, plano médio, PM e bordo de fuga, BF, das pás compósitas reforçadas com fibras de carbono, PCs, e de vidro, PVs.

4.1.1 Comprimento de amostragem (“*cut-off*”) adequado

Seguindo-se os passos para obtenção do “*cut-off*”, tal como foi mencionado no item 3.4.1 da metodologia, fizeram-se duas medições nas pás do parâmetro Ra; usando um comprimento de amostragem inicial de 0,8 mm para cada tipo de pá PV1, PV2, PV3, PC1, PC2, PC3, e obteve-se os resultados apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Dados para obtenção do “*cut-off*” adequado das pás usando o parâmetro Ra

Ra (μm), usando um “ <i>cut-off</i> ” de 0,8 mm						
Número da Medição	PV1	PV2	PV3	PC1	PC2	PC3
1	2,15	2,04	2,11	0,11	0,32	0,23
2	2,35	2,21	2,20	0,76	0,81	0,70

Os resultados obtidos na grandeza da rugosidade Ra, no teste para as PCs, pás reforçadas com fibras de carbono, revelaram que o intervalo de amostragem é o adequado, como se pode conferir da Tabela 3.1, onde para esse intervalo os valores devem ser maiores que 0,1 μm e menores que 2 μm . Por isso manteve-se o valor do “*cut-off*” em 0,8 mm com 5 repetições para as PCs. No caso das PVs, pás reforçadas com fibras de vidro, os valores estiveram fora da faixa aceitável, portanto foi preciso alterar o “*cut-off*” para 2,5 mm com 5 repetições, como é apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2- Intervalo de amostragem (“*cut-off*”) adequado para PVs

Ra (μm) medido com um “*cut-off*” de 2,5 mm nas PVs

PV1	PV2	PV3
2,75	2,94	3,20
4,00	3,56	3,87

Com essa correção, o comprimento de amostragem torna-se adequado para fazer as medições das PVs. Então, fixaram-se os valores para os “*cut-off*” em 2,5 mm com 5 repetições, para logo medir as parâmetros Ra, Rq e Rz para cada pá. Uma vez decididos os comprimentos de amostragem, fizeram-se as medições dos parâmetros da rugosidade (Ra, Rq e Rz) sobre as pás.

Obteve-se que os dados para as três PCs eram similares, e o mesmo aconteceu para as três PVs, logo apresentam-se unicamente os valores para as pás PC1 e PV2, escolhidas aleatoriamente. Os demais dados são apresentados no Apêndice para consulta. No caso particular das pás PC1 e PV2 o número de dados foi maior, do que o coletado para as demais pás, com o fim de enriquecer a discussão.

Assim para as outras pás mediram-se apenas 96 pontos por pá, enquanto que para as pás escolhidas (PC1 e PV2) mediram-se 480 pontos diferentes, para um total de 1440 valores medidos por pá.

Para uma análise quantitativa, mais à frente fez-se a distribuição dos dados por regiões, de modo a facilitar o entendimento. Por enquanto inicia-se com a exibição dos histogramas desses parâmetros (Ra, Rq, Rz) na Figura 4.1. Neles observa-se que os valores para PV2 são em geral maiores em relação aos da PC1.

Além disso, infere-se que os dados para ambas as pás apresentam uma distribuição com forte assimetria positiva (dados concentrados na esquerda). Comparando-se os três parâmetros da rugosidade medidos, tem-se que os parâmetros de Ra e Rq apresentam semelhanças nos valores e na distribuição dos dados. Enquanto que os valores para Rz se distribuem ao redor de valores maiores, o que está de acordo com a revisão da literatura, já que esse parâmetro leva em consideração nas medições os picos e vales maiores.

Para os três histogramas de PC1, os parâmetros de rugosidade medidos têm o seu valor máximo próximo de 4,5 μm . Contudo, para PV2 não se apresenta um único máximo comum para os três casos (Ra, Rq e Rz), assim, o valor máximo para Rz é aproximadamente 70 μm e para Ra e Rq é um pouco maior que 10 μm . Isso indica que os defeitos nas PCs são da mesma ordem da rugosidade, enquanto que para as PVs são substancialmente maiores. A seguir emprega-se como descritor estatístico a moda em vez da média, pelo fato da distribuição dos dados ser tão assimétrica.

As modas para Ra e Rq na PC1 são 0,16 μm e 0,18 μm respectivamente, enquanto que esses valores (Ra e Rq) para PV2 são 1,83 μm e 2,27 μm respectivamente, indicando isso que os valores de Ra e Rq estão distribuídos ao redor de um valor similar. Por outro lado, os valores das modas para Rz são 0,60 μm e 9,97 μm para PC1 e PV2 respectivamente, o que evidencia que os valores de Rz estão distribuídos ao redor de valores bem mais elevados em comparação com Ra e Rq.

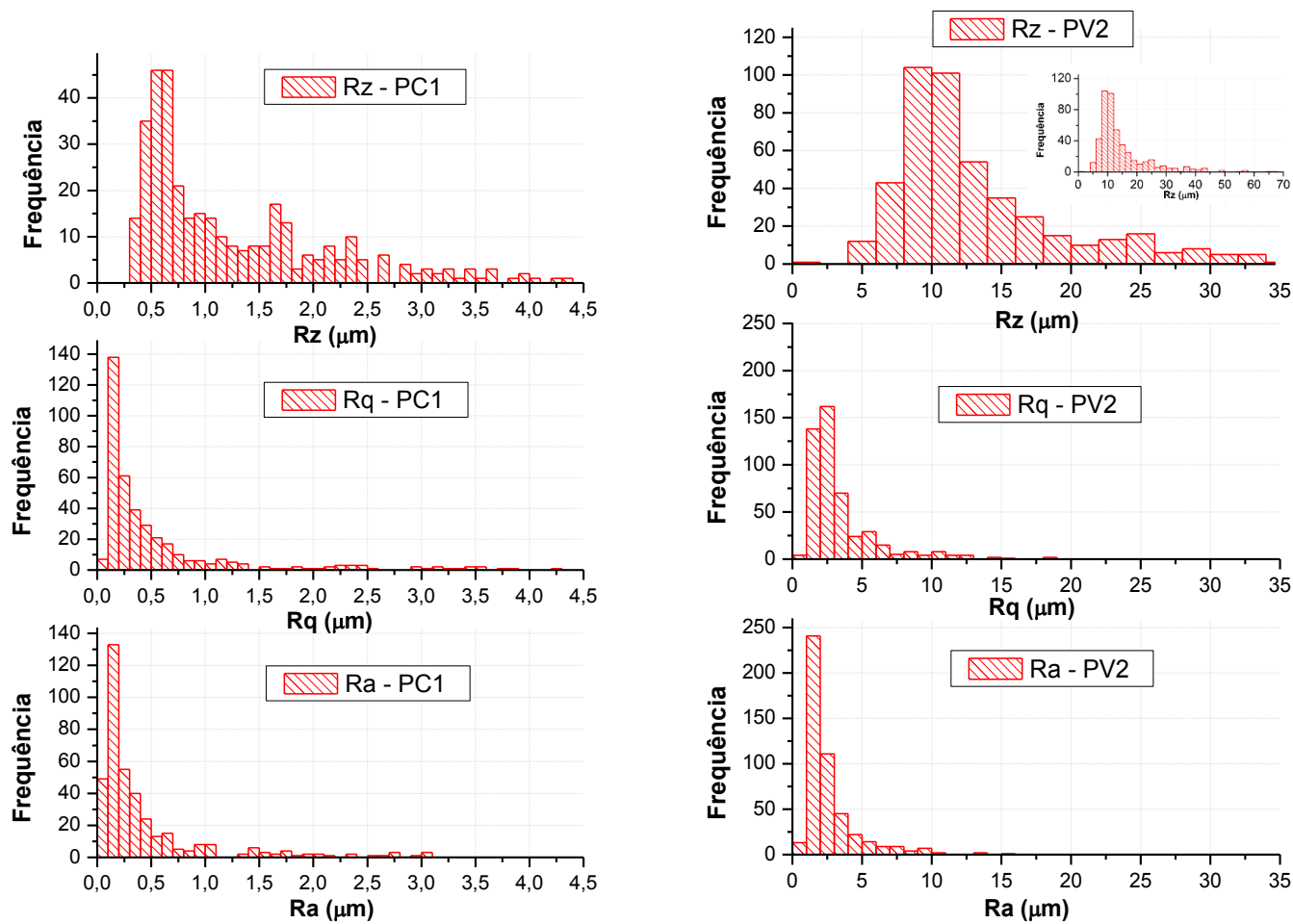


Figura 4.1- Parâmetros Ra, Rq e Rz da Rugosidade, PC1 à esquerda e PV2 à direita

Comparando-se os valores das modas de R_z em relação aos valores de R_a e R_q , o valor da moda de R_z para PC1 é 3,7 e 3,3 vezes maior que nas modas de R_a e R_q respectivamente; no caso da PV2, a moda chega a ser 5,5 e 4,4 vezes maior que as modas de R_a e R_q respectivamente. Isto significa que os parâmetros R_a , R_q e R_z estão mais próximos na PC1 que no PV2.

Encerrando a discussão sobre a Figura 4.1, a própria distribuição assimétrica mostra que são poucas as imperfeições comparadas com o valor da moda, que em valores mais elevados perdem importância numérica, mas que conseguem ser maiores que a moda; por exemplo, na PC1, em R_a , a moda é $0,16 \mu\text{m}$ e tem-se valores até $3,2 \mu\text{m}$ (20 vezes maiores que a moda). R_z se distribui ao redor de valores mais altos do que R_q e R_a devido às imperfeições nas pás, enquanto R_a e R_q se distribuem ao redor de valores similares, indicando imperfeições isoladas. Finalizando, a PV2 apresenta uma rugosidade menos uniforme e com valores mais elevados que a PC1, para explicar o porquê é preciso retornar ao processo de fabricação e aos materiais com que foram feitas as pás.

Os materiais que mais puderam afetar na rugosidade foram as fibras usadas na construção das pás. Os filamentos das fibras de carbono tem diâmetro aproximado de $7 \mu\text{m}$ e os das fibras de vidro $10 \mu\text{m}$. Além disso, os tecidos (que é uma trama periódica de fibras) são de arquiteturas diferentes e tem uma rugosidade própria. O tecido das fibras de vidro é tipo plano (simples), com trama 1x1, e o das fibras de carbono é do tipo 8-satin, com trama 8x1. Os demais materiais utilizados foram os mesmos para ambas as pás. A outra variável a ter em conta é o modo da fabricação, onde as PVs foram fabricadas unindo duas peças para conseguir uma pá completa e só posteriormente foi injetada a espuma de poliuretano; enquanto que as PCs foram fabricadas em uma peça só, construída sobre um núcleo já previamente conformado de poliuretano. As características dos tecidos usados na fabricação das pás são expostas a seguir.

O tecido de fibras de carbono do tipo 8 HS (8 *harness satin*, trama 8x1), que possui menos ondulações que o tecido de fibras de vidro-E, que é plano (*plain weave*) e tem trama simples 1x1, como pode-se constatar na Figura 4.2. Isso porque para cada grupo de 8 cabos de fibras, o tecido 8 HS tem 1 cruzamento, depois a trama passa por 7 cabos de fibra de

urdidura, permanecendo esticada (i.e. sem ondulações). Entretanto, no caso do tecido plano de fibras de vidro-E, sempre há cruzamentos em todos os pontos em que a trama encontra um cabo de urdidura.

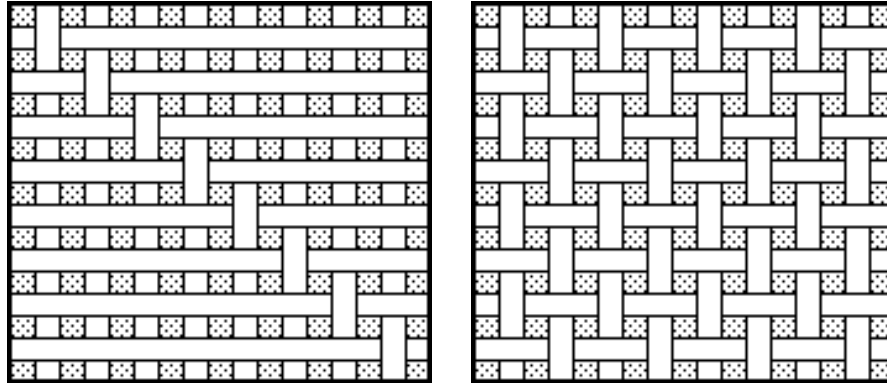


Figura 4.2- Tecido de fibras de carbono (“8_harness_satin”) e tecido de fibras de vidro-E (“plain weave”). http://www.cstsales.com/popular_weave_styles.html (20/10/2013)

Tendo isto claro, pode-se inferir que os três parâmetros da rugosidade medidos para PV2 devem ser maiores do que para PC1, tal como foi observado na Figura 4.1, mas se a rugosidade fosse uniforme, os parâmetros deveriam manter uma relação de valores mais próxima, mantendo a mesma ordem de magnitude. Como não é o caso, infere-se que a rugosidade na PV2 tem um padrão de irregularidades diferente da PC1, tal como o evidencia o alto valor de Rz comparado com Rq e Ra (1,83 μm , 2,27 μm e 9,97 μm são os valores das modas de Ra, Rq e Rz respectivamente). Além disso, ao observar que os valores de Ra e Rq são similares (à moda de Rq é 1,24 vezes à moda de Ra), nota-se que essas irregularidades são pequenas, caso contrário Rq e Rz seriam mais próximos pela definição desses parâmetros.

Uma das causas do porque a pá PV2 tem uma rugosidade menos uniforme que a da PC1, deve-se ao fato de que na sua construção as pás não foram fabricadas em uma peça só, são duas cascas fabricadas independentemente e depois unidas ao longo de seus bordos de ataque e de fuga; enquanto a PC1 foi fabricada assim, como já foi dito. Na fabricação das PCs, iniciou-se moldando um núcleo de espuma de poliuretano, dentro dos moldes.

Posteriormente, este núcleo foi envolvido com tecido de fibra de carbono, impregnado com resina e curado dentro de moldes, formando uma estrutura única. Já nas pás PVs, só após as 2 cascas serem unidas e que a espuma de poliuretano foi expandida no interior das mesmas. Portanto, nas PCs teve-se menos manuseio que nas PVs, o que permite uma rugosidade mais uniforme como consequência correspondente.

As pás, ao serem fabricadas em um processo manual, possuem irregularidades através da superfície de forma não uniforme, ainda que com alguns padrões. Para quantificar essas irregularidades dividem-se as pás em regiões e quadrantes e discute-se o tema separadamente. Para fazer essa discussão considerou-se que os valores das grandezas da rugosidade, por apresentar uma grande assimetria, não podem ser descritas corretamente unicamente por meio da média e do desvio padrão.

Levando em consideração o que acabou de ser dito, propõe-se usar parâmetros adicionais que sirvam de complemento à média, como estimadores do valor da população, e ao desvio padrão, como estimadores da precisão dos dados. Os parâmetros adicionais propostos são a mediana, a “média 1” e a “média 2” - sendo os dois últimos definidos na seção seguinte-, os quais informam como é a variabilidade dos dados.

4.1.2 Histogramas de Ra, Rq, e Rz por quadrantes e regiões

Os resultados divididos em quadrantes permitem ter uma visão particular das pás e encontrar possíveis defeitos (vide Figura 4.3, onde tem-se o desenho por regiões e quadrantes). Na Figura 4.3 encontram-se dois desenhos de pás: na maior estão esquematizados os quadrantes, enquanto que no desenho menor a pá está dividida nas regiões de estudo.

Para apresentar os resultados e obter a máxima informação possível, foram colocados vários parâmetros juntos nos gráficos, assim, na Figura 4.4, fez-se a representação para a mediana, “média 1” e “média 2” que foram usadas nesta subseção.

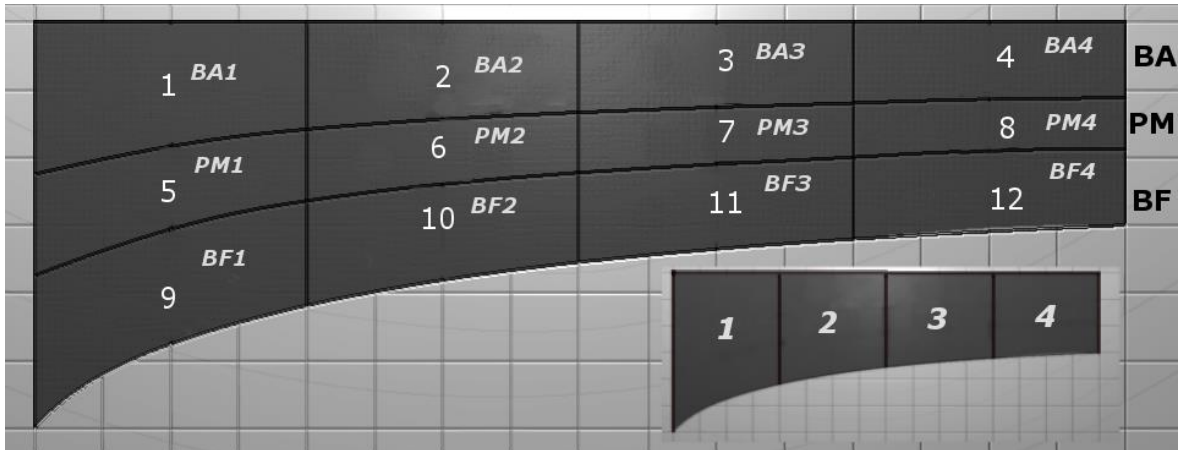


Figura 4.3- Desenho das regiões e dos quadrantes nas pás.

Define-se a “média 1” como a média obtida com os dados que têm valores inferiores à mediana, e a “média 2” como a média obtida com os dados maiores que ela. Entre essas médias forma-se um intervalo que fornece a informação da distribuição dos dados.

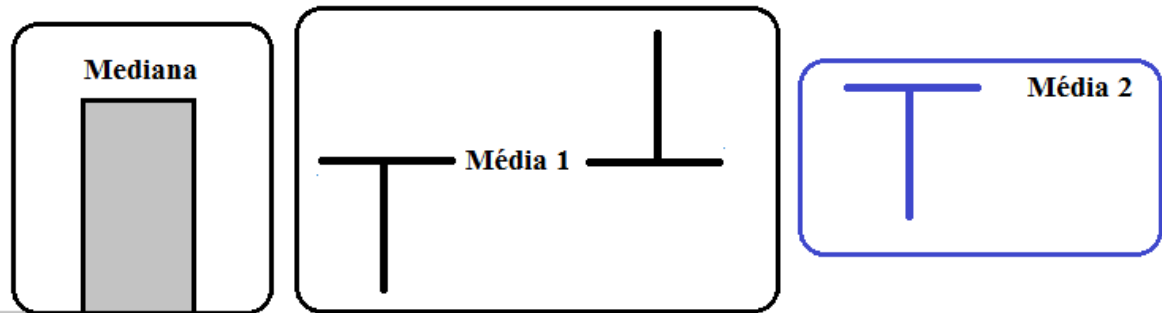


Figura 4.4- Representação usada para a medianas, “média 1” e “média 2” dos parâmetros Ra, Rq e Rz da rugosidade.

Na Figura 4.5 estão os resultados para todos os quadrantes: em cima para a pá PC1 e embaixo para a PV2, na esquerda estão os resultados para o parâmetro Ra, no meio para Rq e na direita para Rz. Tenha-se em conta que a faixa entre a “média 1” e a “média 2” dá uma ideia de como variam os dados, assim, se os dados fossem simétricos a média ficaria no centro do intervalo.

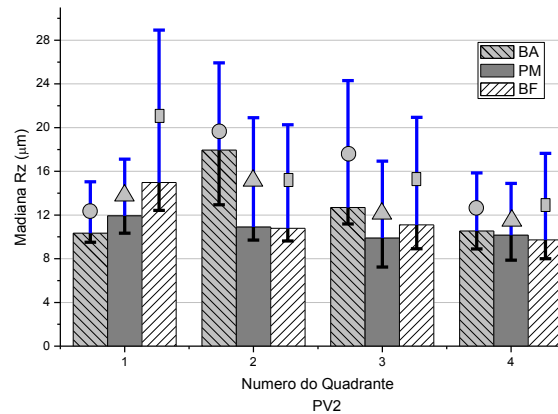
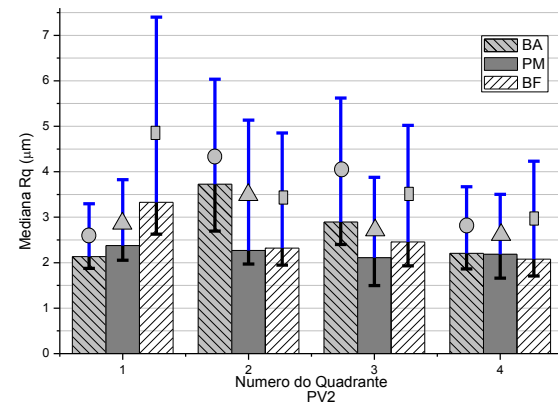
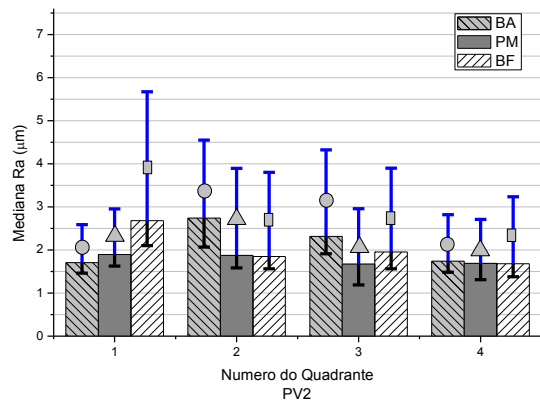
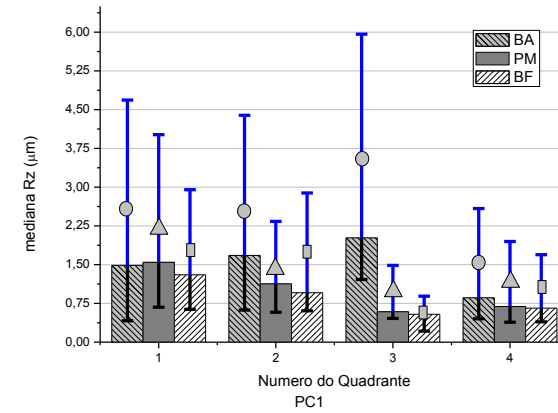
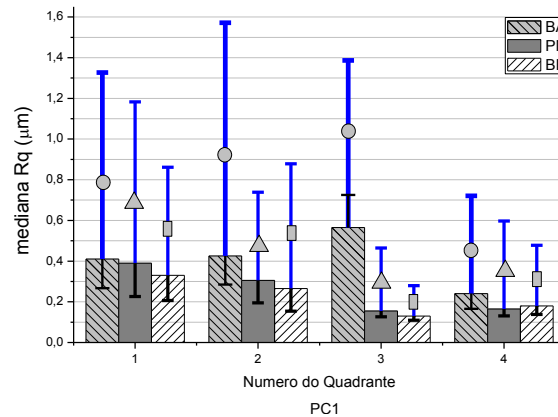
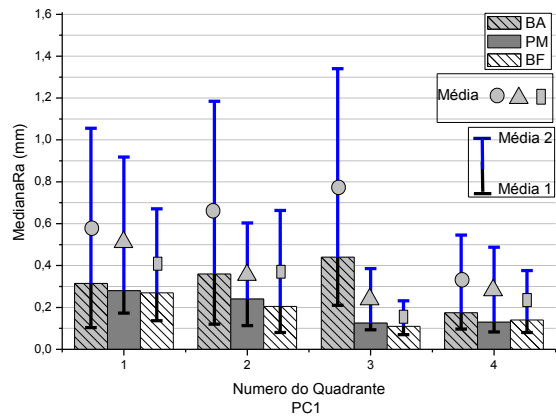


Figura 4.5- Medianas dos BA2, PM2 e BF2, parâmetros Ra, Rq e Rz da rugosidade por quadrantes, PC1 acima e PV2 abaixo

Observe-se que a mediana dos dados para a região BA tanto em PC1 como em PV2, ver Figura 4.5, tem valores mais elevados nos quadrantes do meio (“quadrantes 2” ou “quadrantes 3” das pás), enquanto que para PM e BF, tem-se os maiores valores para os “quadrantes 1” e menores para os “quadrantes 4”, então a rugosidade é maior na base e menor na ponta das pás.

Pode-se inferir que, ao ocorrer esse comportamento em todos os parâmetros, o valor de Ra está dominado por defeitos locais, logo se Rz é maior em um quadrante, o parâmetro Ra também o será.

O anteriormente explicado indica que a rugosidade em geral por toda a pá não é tão díspar como se aparenta nos gráficos de Ra, mas que há defeitos locais que fazem com que se tenham valores muito diferentes nos parâmetros da rugosidade.

Ainda na Figura 4.5, é possível notar como as faixas de cor preta são pequenas se comparadas com as azuis, o que revela pouca variação dos dados menores e reforça o fato de ter alguns dados com valores elevados.

É difícil ter uma avaliação só com um dos parâmetros, por isso normalmente se utilizam dois ou mais parâmetros para chegar a uma conclusão. Assim, por exemplo, usando os parâmetros Ra e Rq pode-se prever como estão distribuídos os defeitos. Vale lembrar que Ra dá a informação da rugosidade média, enquanto que Rq evidencia a presença de picos/vales atípicos. Para fazer essa avaliação é necessário analisar os dados em conjunto, ou seja, observar o que acontece nos arredores.

A seguir faz-se uma discussão sobre os quadrantes em geral e depois dá-se ênfase ao quadrante BA3 da PC1, que tem um comportamento um tanto diferente dos demais quadrantes. No geral, observa-se que há um quadrante que apresenta as faixas maiores para as três grandezas medidas da rugosidade (Ra, Rq e Rz) por tipo de quadrante. Por exemplo, nos quadrantes tipo 2 da PC1 (BA2, PM2 e BF2), BA2 tem as faixas maiores, tal como se vê na Figura 4.6.

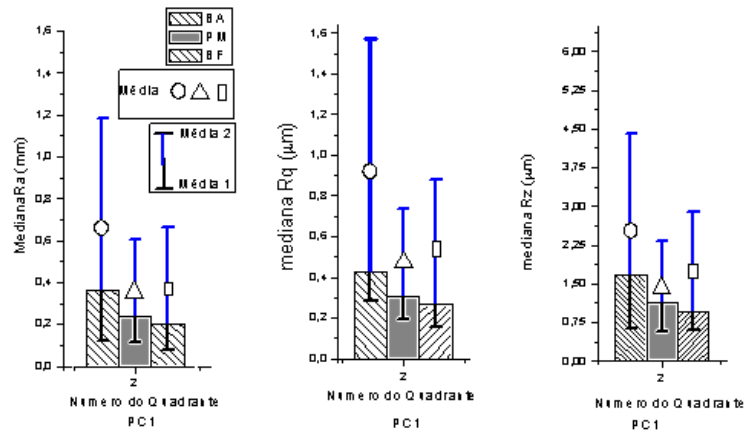


Figura 4.6- Representação usada para a medianas, “média 1” e “média 2” dos parâmetros Ra, Rq e Rz da rugosidade por quadrantes.

De acordo com o anteriormente explicitado, os defeitos em BA2 não são grandes se comparados com a média dos próprios dados, já que as faixas de Ra e Rq são semelhantes, mas esses defeitos são numerosos se comparados com os dos quadrantes PM2 e BF2, devido a que as três faixas são maiores em BA2.

Isso é válido para os demais quadrantes, ainda que não necessariamente com a mesma intensidade. Assim sendo, o quadrante BA2 da PC1 apresenta defeitos numerosos em relação ao PM2 e BF2, em maior quantidade do que o BA4 em relação ao PM4 e BF4, sendo que as medianas de BA4, PM4 e BF4 para ‘Ra’ são 0,17 μm, 0,13 μm e 0,14 μm respectivamente, o que implica que são de fato similares, enquanto que as medianas de BA2, PM2 e BF2 são 0,36 μm, 0,24 μm e 0,20 μm, respectivamente, são díspares.

Agora, no caso de BA3 da PC1, foi percebido que Ra apresenta uma faixa grande em comparação com seus vizinhos; em contrapartida a faixa em Rq diminuiu consideravelmente e, além disso, a “média 1” fica acima da mediana, o que significa que há defeitos grandes em relação à média dos dados. Ao observar o Rz em BA3, percebe-se que a faixa apresenta uma margem de variação grande, se comparada aos seus vizinhos. Somando-se esse fato ao descrito para Rq em BA3, conclui-se que esses defeitos além de ser grandes são poucos em relação ao número de dados da amostragem de BA3.

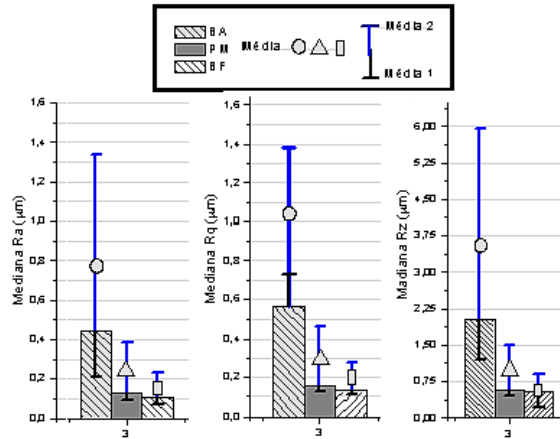


Figura 4.7- Representação usada para a medianas em PC1, “média 1” e “média 2” dos parâmetros.

Para continuar exemplificando a avaliação das pás, observe-se como em Rq e Ra as “médias 1” são menores que as medianas, mas em Ra o efeito das “médias 1” encontra-se aumentado em relação ao descritores para Rq, como se exemplifica na Figura 4.8.

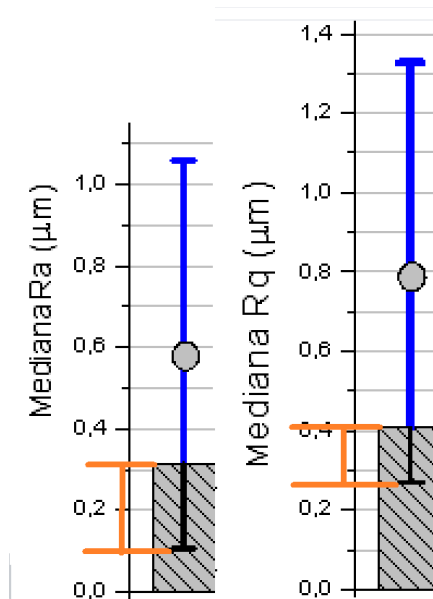


Figura 4.8- Representação usada para a medianas, “média 1” e “média 2” dos parâmetros

Esse fato indica que, em Ra, há uma grande quantidade de dados pequenos em comparação à mediana, e alguns dados maiores (defeitos) que fazem com que a diferença

seja menor em Rq, que coloca precisamente mais peso nos defeitos. Indicando que se têm valores pequenos de rugosidade comparados com os picos e/ou vales atípicos.

Pode-se observar na Figura 4.5 para PV2, que os intervalos entre as “médias 1” e medianas é menor do que o intervalo entre as “médias 2” e medianas, o que leva a perceber que o mesmo comportamento está presente nos parâmetros Ra e Rq para PC1. Desse modo, os dados que têm valores menores que a mediana são relativamente uniformes, enquanto que os dados maiores podem ser considerados como picos e/ou vales. Observe-se que o valor da “média 2” varia muito de quadrante a quadrante, indicando uma forte dependência do setor medido, o qual está relacionado com os defeitos de cada uma.

Comparando-se os valores das parâmetros da rugosidade em PV2 existem para todos os casos maiores valores que a PC1; esses fatos somados aos resultados da Figura 4.1 indicam que tanto por quadrante, como de maneira geral, a PC1 apresenta rugosidade menor, e por tanto, melhor.

Para finalizar a análise da Figura 4.3, comparam-se BA, BF e PM entre si e para cada pá. Conclui-se que em geral BA apresenta valores maiores do que as outras duas regiões, apesar de que BF e PM têm valores similares. E comparando-se os tipos de quadrante observa-se que o quadrante quatro tem os menores valores de rugosidade, enquanto que o segundo quadrante parece ter os maiores valores. Para ter certeza, calcularam-se as médias e medianas por quadrante, obtendo-se a Tabela 4.3 e a Tabela 4.4 para PC1 e PV2 respectivamente. Com elas, pode-se analisar com mais clareza o comportamento dos quadrantes.

Tabela 4.3- Parâmetros de rugosidade por tipo de quadrante para PC1

Tipo de Quadrante	Ra (µm)		Rq (µm)		Rz (µm)	
	Mediana	Média	Mediana	Média	Mediana	Média
1	0,29	0,54	0,33	0,69	1,22	2,40
2	0,27	0,49	0,36	0,64	1,39	2,15
3	0,23	0,41	0,33	0,52	1,23	1,78
4	0,15	0,29	0,19	0,37	0,70	1,34

Tabela 4.4- Parâmetros de rugosidade por tipo de quadrante para PV2

Tipo de Quadrante	Ra (μm)		Rq (μm)		Rz (μm)	
	Mediana	Média	Mediana	Média	Mediana	Média
1	2,09	2,73	2,56	3,51	11,96	15,56
2	2,16	2,91	2,81	3,77	13,56	16,56
3	1,98	2,64	2,54	3,39	11,57	14,92
4	1,70	2,15	2,13	2,77	10,05	12,20

Como se evidencia nas tabelas, os valores mais baixos correspondem à média dos quadrantes “quatro”, e na Figura 4.3 eles apresentam os menores valores, como foi mencionado anteriormente. Assim, os melhores quadrantes são os BA4, PM4 e BF4, enquanto que nos quadrantes “um” e “dois” há mais defeitos que nos outros tipos de quadrantes; logo pode-se afirmar que a rugosidade vai se incrementando desde a base até a ponta da pá.

Agora, a melhor região é a PM para a PV2, e para PC1 não se pode ter certeza com os gráficos da Figura 4.5. Devido a que os valores para as regiões da PC1 estão todos próximos entre si. Por essa razão apresenta-se a Figura 4.9, que contém as médias e medianas por região para fazer a desambiguação, com o objetivo de se ter assim uma ideia mais clara.

Na Figura 4.9 apresenta-se uma barra com a média e o desvio padrão, como uma linha, para reafirmar que eles não são os parâmetros mais adequados para avaliar a rugosidade. Como se observa nas faixas da maioria dos gráficos, a parte de baixo fica reservada para valores negativos (ou bem abaixo da mediana), mostrando uma variação muito grande para esses valores, o que não é verdade, como pode-se conferir ao observar nas faixas desde as “médias 1” até as medianas, que indicam que pelo menos a metade dos dados não possui tal variação.

Retomando, as melhores regiões são a PM para PV2 como já foi dito, e BF para PC1 (Figura 4.9). Como é observado no caso da PC1, os menores valores dos descritores estão

em PM e BF e os parâmetros médios e medianos de Ra são similares: valores médios de 0,37 μm e 0,31 μm e medianos de 0,19 μm e 0,18 μm para PM e BF respectivamente.

Esse fato deixa claro que PM e BF têm características parecidas, mesmo que PM, por ter um desvio padrão e uma faixa menor entre a “média 1” e a “média 2” que BF, apresente parâmetros levemente melhores da rugosidade.

Para encerrar a discussão é feita uma análise usando a média e o desvio padrão, análise tradicional, para observar o porque desde o ponto de vista desta dissertação não é maneira mais adequada para os dados obtidos dos parâmetros Ra, Rq e Rz nas pás.

Assim da Figura 4.9 e da Figura 4.10 é observado como a média têm um valor maior aos dados que esta representando, e como o desvio padrão indica uma distribuição de dados central ao redor da média inexistente. Da Figura 4.10 é observado que a quantia de números a possível existência de valores negativos para os parâmetros de rugosidade. está posicionada muito por encima e os desvios padrões para os quadrantes mostram uma dispersão de dados termina-se a análise dos dados, sem operar nenhum tipo de transformação neles. Como foi explicado na metodologia, também é possível fazer uma análise transformando os dados, onde a média e o desvio padrão são usados como referência para analisar como vão mudando esses descritores em todo o processo.

No Apêndice 6.2, apresentam-se os resultados obtidos para o teste de normalidade e a transformação dos dados, começando pela comparação entre os dados originais e distribuídos em intervalos não uniformes, os quais foram denominados dados modificados.

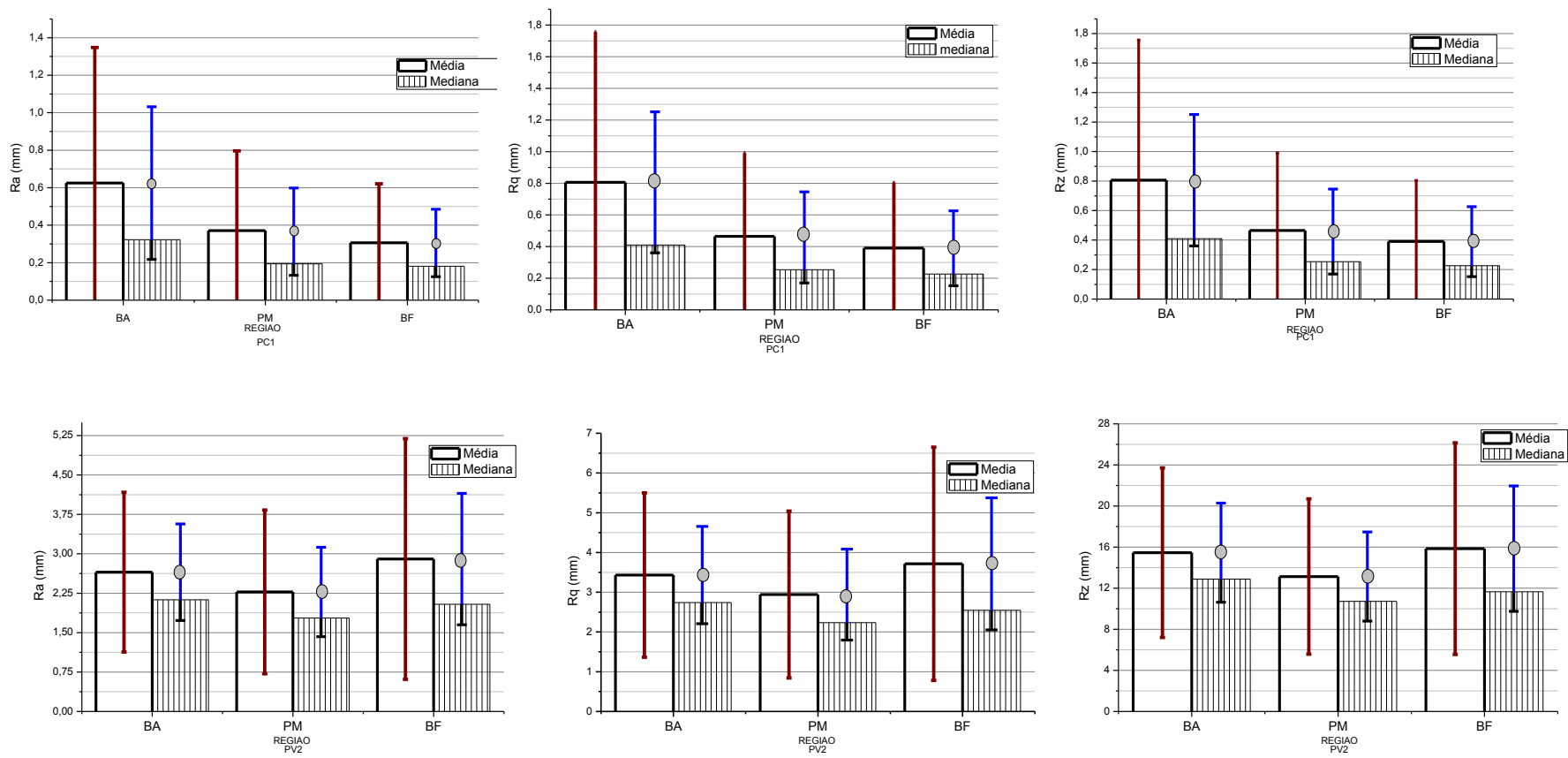


Figura 4.9- Parâmetros Ra, Rq e Rz da rugosidade por regiões, PC1 acima e PV2 embaixo

4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DA GEOMETRIA DAS PÁS

A seguir apresentam-se os resultados mais relevantes do estudo da superfície nos modelos das pás, assim como da comparação com o modelo GT.

4.2.1 Modelagem das superfícies das pás compósitas

Os modelos analisados com o *software* Rhinoceros 5.0 deram como resultado as distâncias médias dos pontos à superfície estudada. Neste caso, os pontos são os que se coletaram com a MMC. Além disso, se obteve o desvio padrão dessas distâncias e as medianas; todas as medidas estão em milímetros. Apresentam-se esses resultados na Tabela 4.5.

Esses resultados foram obtidos seguindo os passos descritos na metodologia que tem como objetivo garantir um padrão para todos os modelos das pás. Esses resultados são apresentados na Figura 4.10.

Tabela 4.5- Resultados obtidos com *Rhinoceros* 5.0 na modelagem da superfície das pás com 176 pontos

	GPV1	GPV2	GPV3	GPC1	GPC2	GPC3	GPP
Distância média (mm)	0,188	0,187	0,171	0,193	0,181	0,158	0,151
Desvio Padrão (mm)	0,211	0,224	0,199	0,206	0,180	0,194	0,146
Distância Mediana (mm)	0,124	0,119	0,110	0,152	0,147	0,088	0,121

Pode-se observar uma escala em cores na Figura 4.10, que indica o distanciamento dos pontos coletados com o MMC em relação aos modelos. Assim, a cor vermelha indica o intervalo com o maior afastamento tido em conta para conseguir ter 176 pontos (ao redor de 0,58 mm) e a azul foi utilizada para os pontos mais próximos (não mais de 0,1 mm) da superfície.

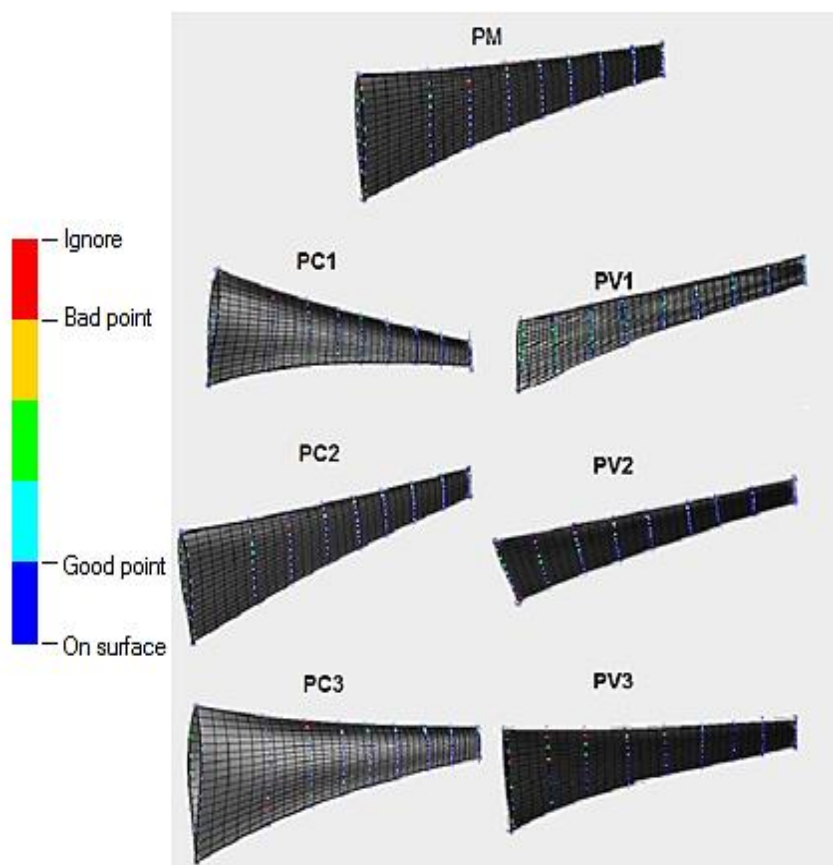


Figura 4.10 – Afastamentos dos Pontos aos Modelos Geométricos

Dos resultados obtidos dos modelos das pás com *Rhinoceros 5.0*, faz-se as médias da distância e o desvio padrão por tipo de pá (PV e PC), para comparar com os resultados do GPP, esses dados são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6- Média dos resultados obtidos com *Rhinoceros 5.0*, para a superfície gerada para as pás

	GPVs	GPCs	GPP
Média das distâncias médias (mm)	0,182	0,177	0,151
Desvio Padrão das médias (mm)	0,009	0,018	

Desta tabela, infere-se que os GPCs apresentam uma representação levemente melhor da superfície em relação aos GPVs. Os valores não apresentam diferenças significativas,

sendo que em média, os modelos para o grupo PV são 1,03 e 1,09 vezes maiores que as distâncias médias e desvios padrões do que para os mesmos valores nos modelos de PC.

A distribuição dos dados para o grupo das PVs tem um comportamento melhor do que para as PCs, ainda que cada grupo só esteja composto por três pás, pelo que não se pode chegar a afirmar, pode-se apenas dizer que as distâncias médias dos pontos à superfície nos GPVs foram duas vezes mais próximas entre si do que para o grupo de PC.

Isso implica que se tenha uma maior uniformidade nas distâncias dos pontos nos modelos das PVs que nas PCs, embora os GPV tenham piores valores nos descritores. Assim sendo, ainda que as PCs em média se ajustem melhor a seus próprios modelos, as PVs são mais parecidas entre elas do que as PCs.

No referente aos valores dos grupos com respeito ao GPP, ambos os grupos possuem valores mais elevados tanto nas distâncias médias, como nos desvios padrões, indicando que um melhor ajuste da superfície foi obtido na pá precursora.

Depois de obter como os modelos geométricos das pás se ajustam aos pontos coletados, e assim ter verificado que tão bons são para representá-las; tem-se que fazer a comparação com o GT para saber se elas (as pás) estão de acordo com ele.

Começa-se mostrando, na seção seguinte, os desvios dos eixos centrais nas pás com respeito ao eixo do GT.

4.2.2 Comparação dos modelos das pás compósitas com o modelo GT

Comparando-se os modelos geométricos das pás com GT, descobriu-se que eles apresentam um desvio em relação ao eixo central do GT. Esses desvios são mostrados na Tabela 4.7, onde o desvio ao eixo está em graus, e o afastamento ao final do eixo está em milímetros.

Tabela 4.7- Afastamento dos Eixos Centrais dos Modelos ao Eixo Central do GT

	GPP	GPC1	GPC2	GPC3	Média GPCs	GPV1	GPV2	GPV3	Média GPVs
Ângulo ($^{\circ}$)	0,38	2,12	2,54	2,04	2,33	2,60	2,45	2,38	2,48
Distância (mm)	8,18	32,75	38,38	32,57	34,57	40,42	37,86	37,80	38,69

Pode-se inferir da tabela que os GPVs apresentam desvio médio de $2,48^{\circ}$ e um afastamento médio de 38,69 mm em relação ao eixo central do GT. Já o grupo dos GPCs tem um desvio médio de $2,33^{\circ}$ e um afastamento médio de 34,57 mm ao mesmo eixo. Esses afastamentos em distâncias representam 4,6% e 3,9% do eixo central do GT para os GPVs e GPCs respectivamente. Vale lembrar que o eixo tem um comprimento de 880 mm.

Portanto o desvio ao eixo central no grupo das PVs em média é maior $0,15^{\circ}$ e 0,7% do seu comprimento. Assim, esses dados indicam que os afastamentos não são representativos estatisticamente, já que o desvio padrão dos desvios do eixo central de GT em graus para as PCs é de $0,27^{\circ}$ e para as PVs é de $0,11^{\circ}$, o que faz com que se interceptem os intervalos.

O proposto anteriormente é válido quando se consideram os desvios pertencentes a uma população gaussiana; o fator k usado foi 1,886 do teste *t-student* para três dados com 90% de abrangência. Então os intervalos para PVs e PCs se tornam $2,33 \pm 0,50$ mm e $2,46 \pm 0,21$ mm respectivamente.

Contudo, comparando-se os desvios médios dos grupos de GPVs ($2,48^{\circ}$) e GPCs ($2,33^{\circ}$) em relação aos desvios do GPP ($0,38^{\circ}$), vê-se que eles são maiores, 6,1 e 6,6 vezes respectivamente, indicando que a PP está mais próxima do GT do que as outras pás.

Lembrando que na produção das pás primeiro foi feito o molde de madeira a partir do GT, depois a PP serviu de molde macho para fazer o molde em fibra de vidro com o qual foram feitas as PVs e PCs, pode-se explicar que a PP tenha menor desvio comparada com as outras pás, já que apresenta menor acúmulo de erros, ao estar mais próximo do GT na

cadeia de produção. Para se ter uma ideia clara do que indica que os eixos centrais das pás possuem um desvio em relação ao GT, elabora-se um gráfico, exibido na Figura 4.11.

No gráfico, apresenta-se o modelo da pá que apresentou maior desvio, com objetivo de ter uma melhor visualização. O modelo escolhido foi o GPV1. Na parte de cima da figura encontram-se os dois modelos geométricos, e na parte de baixo estão representados seus eixos centrais; a linha verde representa o eixo central da PV1, ao passo que a linha vermelha representa o eixo central do GT. Além disso, inscreveram-se os valores para o afastamento em graus e em milímetros da PV1 ao GT.

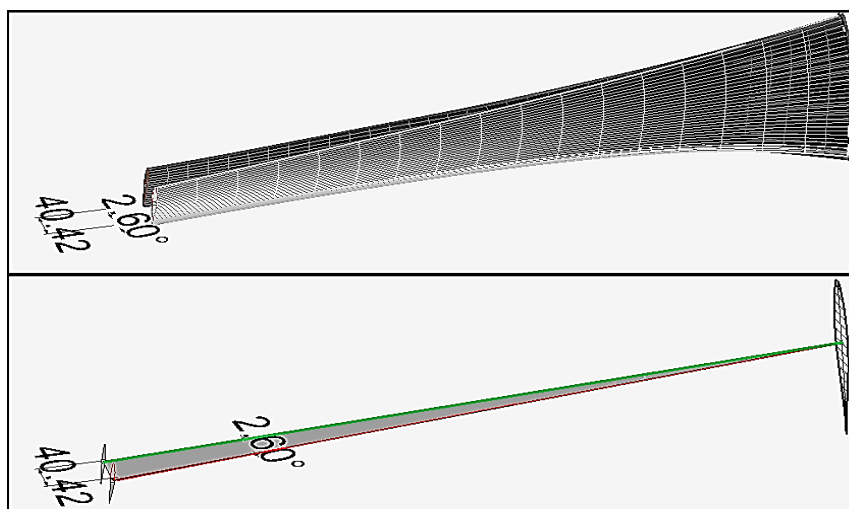


Figura 4.11- Afastamento entre o eixo da PV1 e o eixo do GT

A partir do desvio dos modelos ao eixo GT, pode-se corrigi-los para fazer uma comparação entre as superfícies e o GT. Essa comparação foi feita na seção seguinte.

4.2.3 Comparação dos perfis de cada modelo das pás compósitas com os perfis do modelo GT

Tal como foi descrito na metodologia, foi preciso uma transformação dos modelos para ser comparados com o GT. Essa transformação consistiu em fazer correções nos modelos das

pás de maneira que compartilhassem o mesmo eixo central do GT, de modo que os modelos são praticamente indistinguíveis, tal como ilustra a Figura 4.7, onde aparece o GPV1 depois das correções, e se observa que os dois modelos se encontram próximos.

Na figura, a superfície em azul é o modelo GT e a superfície em marrom é GPV1 modificado; os pontos fazem parte da superfície do GPV1 modificado.

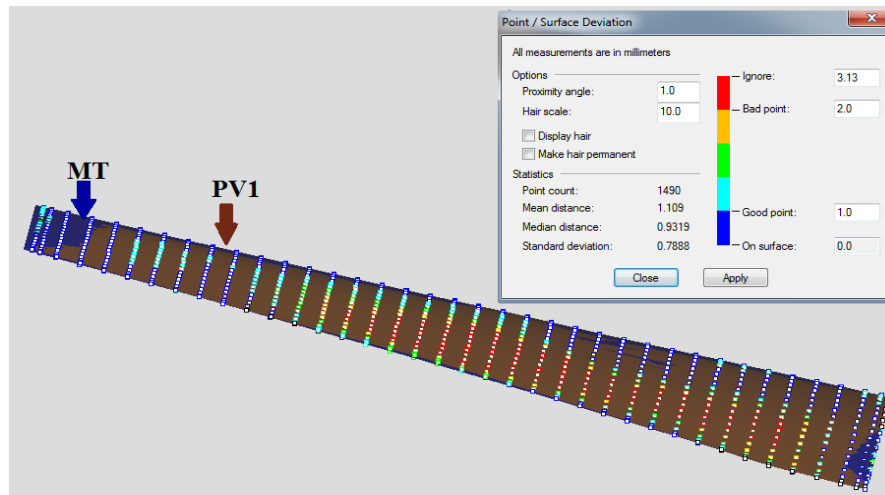


Figura 4.12- Sobreposição do PV1 com GT

Tem-se feito uma análise em *Rhinoceros* 5.0 da distância desses pontos em relação à superfície do modelo GT, obtendo-se os resultados exibidos na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Descritores Estatísticos dos afastamentos dos pontos dos Modelos ao GT

	GPP	GPC1	GPC2	GPC3	Média GPCs	GPV1	GPV2	GPV3	Média GPVs
Média, Xm (mm)	0,643	1,239	1,200	0,781	1,073	1,109	0,885	1,027	1,007
Mediana, Md (mm)	0,494	0,963	1,060	0,659	0,894	0,932	0,885	0,898	0,905
Desvio padrão, S (mm)	0,527	0,985	0,908	0,599	0,830	0,789	0,588	0,751	0,709

Nesta Tabela pode-se conferir como o GPP se ajusta melhor ao GT, se comparado com os GPVs e GPCs. Assim, a distância média dos pontos ao GT é em média 1,67 e 1,57 vezes menor que para os GPCs e GPVs respectivamente. Também tem um desvio padrão menor, indicando uma menor dispersão dos pontos. Portanto a PP é a melhor pá com relação ao conformado geométrico.

O menor valor na assimetria do GPV2 em relação aos demais modelos indica que os pontos estão mais uniformemente distribuídos ao redor da sua própria média, pode-se dizer que esse modelo aproxima-se mais do GT do que os modelos de PV1, PV3, PC1 e PC2.

Ainda que o GPC3 tenha uma distância média menor que o GPV2, não se pode afirmar que se aproxime mais do GT, já que o tanto desvio padrão, como as distâncias médias deles têm valores parecidos (0,781 e 0,885 para as médias, 0,599 e 0,588 para os desvios respectivamente para GPC3 e GPV2). Logo, GPC3 e GPV2 são os modelos que mais se aproximam do GT e podem ser considerados os melhores modelos, em relação às pás estudadas, com exceção da PP (que é a pá com o modelo mais próximo do GT).

Nesta seção apresentaram-se os resultados da avaliação do conformado geométrico das pás, fazendo uma comparação de como os modelos se ajustaram aos pontos coletados para cada pá. Avaliaram-se os modelos GPVs, GPCs e GPP.

Além disso, compararam-se esses modelos com o GT para observar o ajuste e ter uma ideia de quais pás tinham um melhor conformado. A partir dos resultados da avaliação da geometria das pás, apresentam-se a seguir os resultados das provas mecânicas, para finalizar com a avaliação geral das pás.

4.3 ESTIMATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EFETIVO DE PÁS COMPÓSITAS USANDO VALORES DE DEFLEXÃO EXPERIMENTAL POR MEIO DE SIMULAÇÕES EM ANSYS 14.5 E EQUAÇÕES MATEMÁTICAS

4.3.1 Resultados das deflexões medidas experimentalmente

A seguir mostram-se os resultados para as deflexões verticais das pás em tabelas contendo a média das medições, seu desvio padrão. Os dados completos para consulta estão no apêndice 6.2.

Iniciou-se com a Tabela 4.9, que tem os dados para PC1; dela pode-se inferir que em média a os valores num 90% estarão no intervalo de $\pm 1,1$ mm. Mesmo que esses valores de incertezas sejam similares para todos os dados, eles são mais relevantes para as medidas com valores menores.

Assim, tem uma grande importância para o primeiro dado com valor médio de 2,11mm e incerteza de 1,12mm, já que o intervalo onde se encontram a maioria dos dados (90%) representa 53% do seu valor. Enquanto que para o último dado (com média de 15,77mm) a representa 8 % de seu valor.

Tabela 4.9 – Deflexões para PC1

Força (N)	Deflexão (mm)				
	Número de dados	Média	Desvio Padrão	Fator de abrangência ao 95%	Incerteza Estimada
1,528	6	2,11	0,55	2,015	1,12
3,699	6	5,01	0,76	2,015	1,53
5,851	6	7,55	0,41	2,015	0,82
8,000	6	10,57	0,54	2,015	1,08
10,151	6	13,07	0,51	2,015	1,02
12,315	3	15,77	0,45	2,920	1,32

Esse comportamento se repete nas outras pás. O intervalo onde tem-se o 90% dos dados é estimada como próxima de 1mm para todos os dados, faz com que nos dados menores surja uma grande dúvida sobre sua validade. Os dados de deflexão-carga foram usados para encontrar uma equação que represente o comportamento das pás. Como foi mencionado na metodologia, usa-se como hipótese que tal comportamento era linear, assim, usando a regressão linear achou-se a pendente e o intercepto da melhor reta para os dados experimentais. Obtendo-se que eles se ajustam muito bem a uma reta, justifica a confiança que se tem confiança de que os dados experimentais apresentam um comportamento linear, ainda que para os dados pequenos haja uma grande incerteza sobre seu valor.

Das Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11, infere-se que PC2 apresenta menores deflexões para pesos similares, além de apresentar menores incertezas estimadas que PC1 e PC3, enquanto que PC3 apresenta valores de deflexão menores do que PC1, mesmo que pelos intervalos de confiança estimados não sejam diferentes estatisticamente. Isto se deve ao fato de que as faixas nas quais as médias poderiam variar segundo os intervalos de confiança se entrecruzam, como exemplo, para um carregamento 12,315 N as deflexões são 15,77mm e 15,42 para PC1 e PC3 respectivamente,. Este exemplo está desenhado na Figura 4.13.

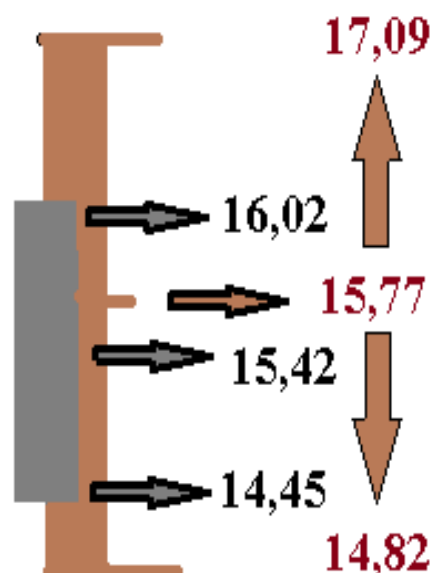


Figura 4.13- Entrecruzamento dos intervalos de confiança com um fator de abrangência de 95% para PC1 e PC3

Tabela 4.10 – Deflexões para PC2

Força (N) mg	Deflexão (mm)				
	Numero de dados	Média	Desvio Padrão	Fator de abrangência ao 95%	intervalos de confiança
1,528	6	1,39	0,45	2,015	±0,91
3,677	6	3,49	0,54	2,015	±1,10
5,829	6	5,77	0,56	2,015	±1,12
8,000	6	8,00	0,37	2,015	±0,75
10,151	6	10,11	0,51	2,015	±1,03
12,315	3	12,89	0,37	2,920	±1,07

Tabela 4.11 – Deflexões para PC3

Força (N) mg	Deflexão (mm)				
	Numero de dados	Média	Desvio Padrão	Fator de abrangência ao 95%	intervalos de confiança
1,528	6	1,82	0,99	2,015	±2,00
3,677	6	4,54	0,94	2,015	±1,90
5,829	6	7,16	0,83	2,015	±1,68
8,000	6	9,66	1,16	2,015	±2,33
10,151	6	12,67	0,58	2,015	±1,17
12,315	3	15,42	0,20	2,920	±0,59

Agora, das Tabelas 4.12, 4.13 e 4.14, pode-se concluir que os valores das deflexões para PV3 são menores que para as demais PV, enquanto que pode-se afirmar que PV1 e PV2 têm valores médios de deflexões similares para as diferentes cargas, e além disso apresentam entrecruzamento em todos os intervalos de confiança.

Tabela 4.12 – Deflexões para PV1

Força (N) mg	Deflexão (mm)				
	Numero de dados	Média	Desvio Padrão	Fator de abrangência ao 95%	Intervalos de confiança
1,528	6	1,47	0,33	2,015	±0,67
3,677	6	4,04	0,89	2,015	±1,79
5,829	6	6,24	0,39	2,015	±0,79
8,000	6	8,85	0,38	2,015	±0,76
10,151	6	10,95	0,66	2,015	±1,33
12,315	3	13,81	0,42	2,920	1,21

Tabela 4.13 – Deflexões para PV2

Força (N) mg	Deflexão (mm)				
	Numero de dados	Média	Desvio Padrão	Fator de abrangência ao 95%	Intervalos de confiança
1,528	6	1,46	0,83	2,015	±1,66
3,677	6	4,20	0,63	2,015	±1,27
5,829	6	6,55	0,45	2,015	±0,90
8,000	6	8,69	0,77	2,015	±1,55
10,151	6	10,99	0,64	2,015	±1,29
12,315	3	13,20	0,44	2,920	±1,29

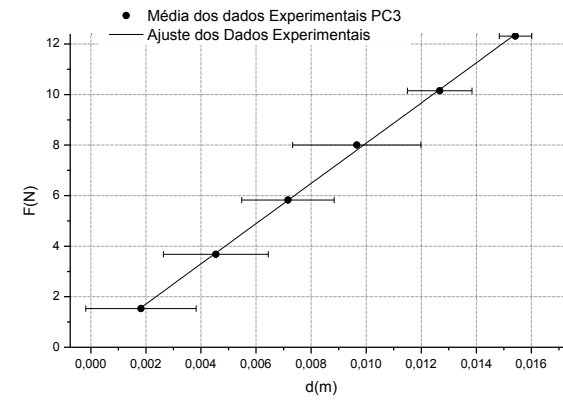
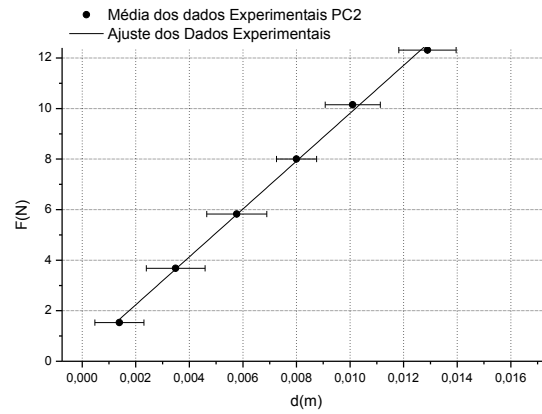
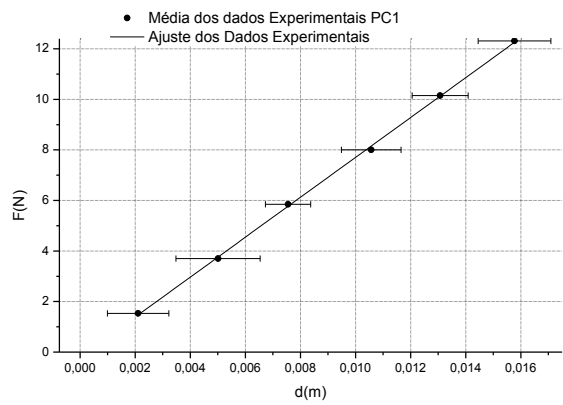
Tabela 4.14 – Deflexões para PV3

Força (N) mg	Deflexão (mm)				
	Numero de dados	Média	Desvio Padrão	Fator de abrangência ao 95%	Intervalos de confiança
1,528	6	1,37	0,76	2,015	±1,52
3,677	6	3,64	0,77	2,015	±1,55
5,829	6	5,96	0,79	2,015	±1,60
8,000	6	8,21	0,49	2,015	±0,99
10,151	6	10,32	0,51	2,015	±1,02
12,315	3	12,40	0,24	2,920	±0,69

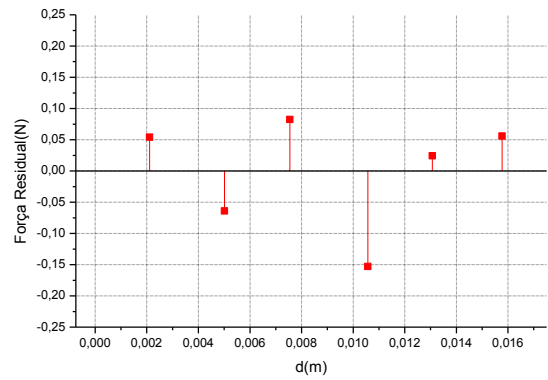
Para obter o análise média dos dados se ajustam os valores a uma linha reta, para obter uma pendente e intercepto que dão informação do comportamento elástico das pás, além se calcula os desvios padrões e o coeficiente de correlação linear. Na Tabela 4.15 apresentam-se os resultados dos descritores estatísticos das retas, e nas Figuras 4.14 e 4.15 os gráficos das regressões lineares, com os intervalos de confiança.

Tabela 4.15 – Descritores das retas obtidas nas Deflexões das Pás Compósitas

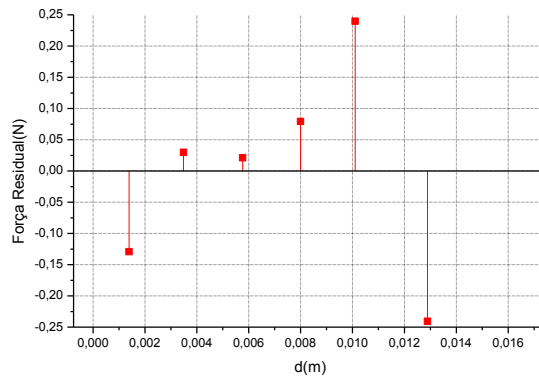
	Intercepto (N)		Pendente (N/m)		Coeficiente de Correlação Linear
	Valor	Desvio Padrão	Valor	Desvio Padrão	
PC1	-0,19	0,09	789,51	8,86	0,999
PC PC2	0,34	0,16	947,65	19,64	0,998
PC3	0,12	0,10	795,45	9,91	0,999
PV1	0,21	0,13	886,75	15,19	0,999
PV PV2	-0,06	0,16	928,55	18,68	0,998
PV3	0,11	0,09	974,79	11,09	0,999



PC1



PC2



PC3

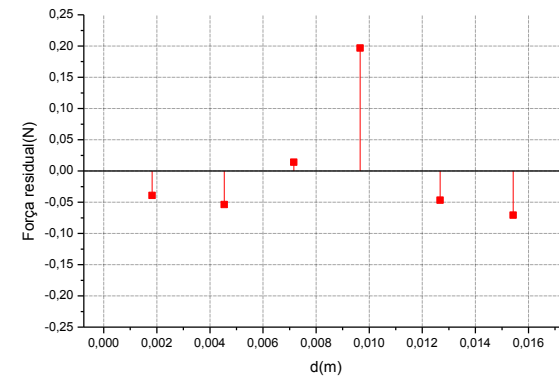
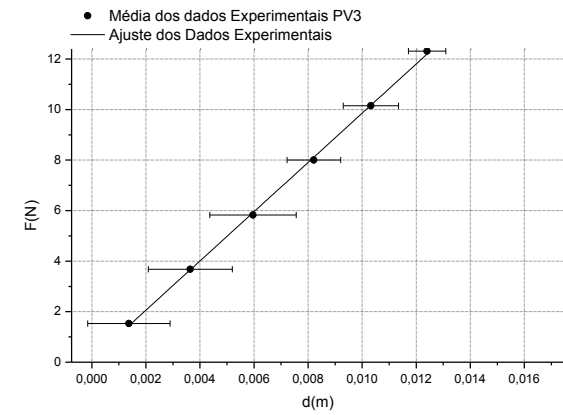
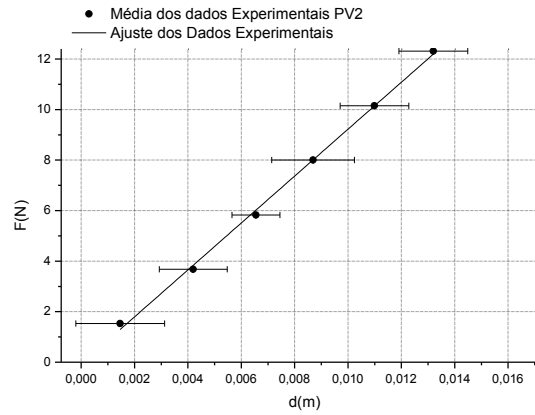
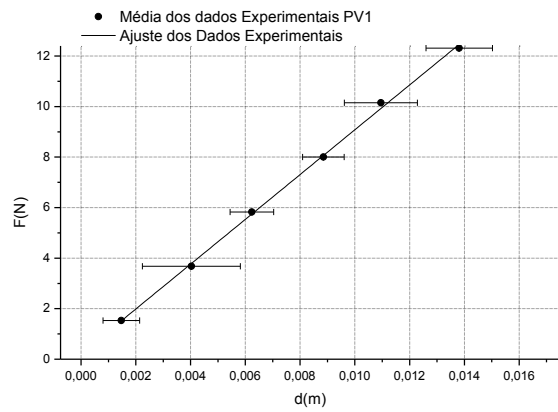
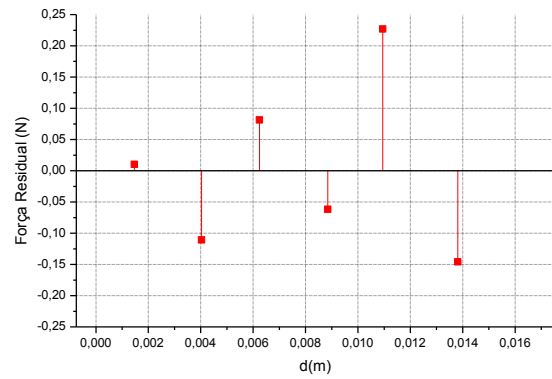


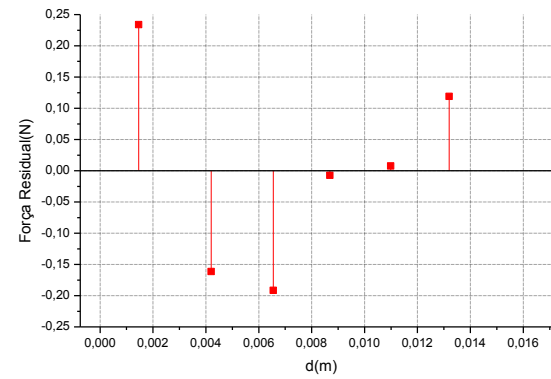
Figura 4.14- Regressão Linear dos Dados de Deflexão para as PCs



PV1



PV2



PV3

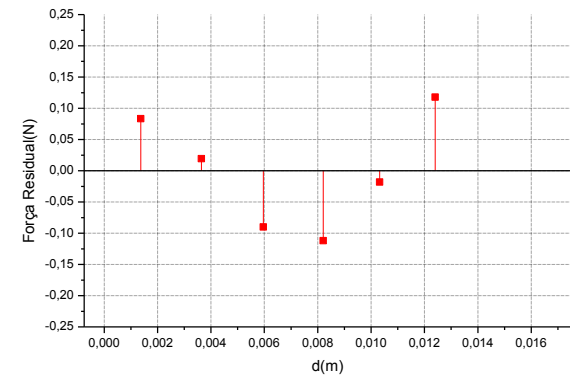


Figura 4.15- Regressão linear dos dados de deflexão para as PVs

Observa-se da Tabela 4.15, que todos os coeficientes de correlação são próximos a um, implicando que o ajuste linear para o comportamento dos dados seja acertado. No que diz respeito aos interceptos, são pequenos, como era esperado, já que o seu valor teórico é zero.

Quanto aos valores das pendentes, que estão associadas aos módulos elásticos das pás, infere-se uma grande variabilidade, tal como se observa pela diferença entre as médias. Desse modo, entre o menor e o maior valor das pendentes para PC tem-se uma diferença de 158N/m, que implica 17% do valor do máximo. Fazendo o mesmo cálculo para PV2, tem-se uma diferença de 88N/m, que representa 9% do valor máximo.

Dando prosseguimento à análise, calculam-se as médias das médias e dos desvios padrões para PCs e PVs, usando as Equações (2.7) e (2.8).

Tabela 4.16 – Descritores das retas obtidas nas deflexões das pás compósitas

	Intercepto		Coeficiente angular	
	Valor (N)	Desvio Padrão	Valor (N/m)	Desvio Padrão
PC	0,04	0,10	822,19	11,86
PV	0,10	0,11	935,32	13,25

Infere-se da Tabela 4.16, que as PCs têm um módulo de elasticidade menor do que as PVs. Isso pode ser explicado tendo-se em conta que a espessura das PVs é de 1,12mm, enquanto que a das PCs é de 1,0mm.

Usando os dados da Tabela 4.16, estimam-se os valores para as deflexões corrigidas do grupo de PVs e PCs, usando as Equações (3.7) e (3.9).

$$\varepsilon_{d_sist} = \frac{b}{m} \quad (4.1)$$

$$\delta = \delta_{exp} - \varepsilon_{d_sist} \quad (4.2)$$

Assim, ε_{d_sist} é igual a $4,9 \times 10^{-5}$ e a $1,07 \times 10^{-4}$ para o grupo de PCs e PVs, respectivamente. Para uma carga de 12,315N, as deflexões corrigidas para PCs e PVs são, respectivamente, 14,88 mm e 12,95 mm. Enquanto que os valores experimentais formam em média 14,70 mm

(1,2% relativamente menor) e 13,13 mm (1,4% relativamente maior) para as PCs e PVs, respectivamente.

A continuação apresentam-se dois métodos para encontrar os módulos efetivos elásticos para as pás. Esses métodos fazem uso dos valores calculados nesta seção, e além de algum procedimento que no caso do “método 1” foi o método dos momentos de áreas, e entanto que o “método 2”, usou simulações com ANSYS.

4.3.2 Modelo estático para aplicar o método dos momentos de áreas, método 1

Usaram-se como entradas as deflexões corrigidas para o programa feito em *Matlab 2012*, com o objetivo de encontrar os valores dos módulos efetivos. Entretanto, primeiro determinou-se o número de cilindros adequados, onde o valor dos módulos converge, como ilustra a Figura 4.16. Pode-se observar que o número adequado de cilindros é 40, para ambos os grupos de pás PCs e PVs, aproximadamente.

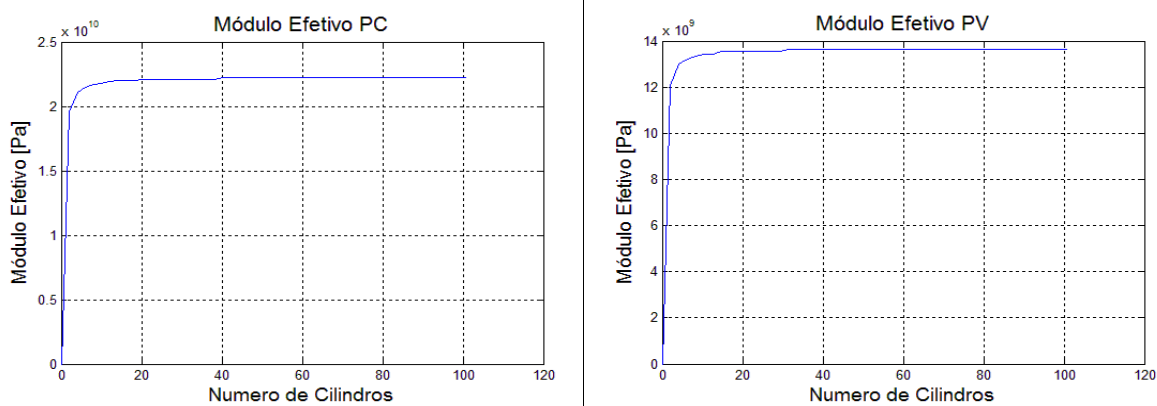


Figura 4.16- Módulo efetivo para as PCs e PVs

Com o número de cilindros determinado, pôde-se obter os valores da deflexão usando como entrada no programa um valor superior que 40, 50, neste caso. Obteve-se assim, os seguintes valores de módulos efetivos: $1,37 \times 10^{10}$ Pa e $2,22 \times 10^{10}$ Pa, para PVs e PCs respectivamente

O programa em *Matlab 2012* foi realizado seguindo o método de áreas. Primeiro dividiu-se a pá em cilindros elípticos, como foi mencionado no capítulo anterior. No programa, também levou-se em consideração, as propriedades da haste de alumínio, para assim considerar o que aporta na deflexão. Com esse programa conseguiu-se calcular que a deflexão era de 2,3 mm.

Mesmo que o valor seja calculado pelo programa, apresenta-se aqui um resumo dos cálculos matemáticos para exemplificar como funciona o programa.

Na Figura 4.17 encontra-se o desenho simplificado da geometria das pás, para fazer o cálculo da deflexão da haste, denominado na figura como '1'. Na figura se marcaram os centroides das áreas do diagrama M/EI que foram usados nos cálculos para achar a deflexão da haste.

Na Figura 4.17 encontra-se o desenho simplificado da geometria das pás, para fazer o cálculo da deflexão da haste, representado no desenho como '1', marcaram-se os centroides das áreas do diagrama M/EI que foram usados nos cálculos para encontrar a deflexão da haste.

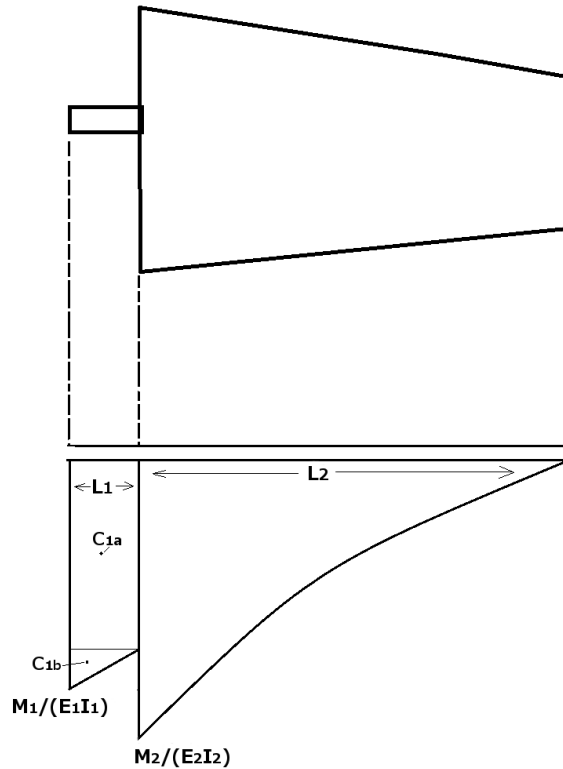


Figura 4.17- Desenho simplificado da geometria das pás e do diagrama M/EI, onde o primeiro segmento representa a haste da pá

A seguir apresentam-se os cálculos para achar a deflexão da haste das pás:

$$I_1 = \frac{\pi}{64} \times (d_{H_ext}^4 - d_{H_int}^4)$$

$$I_1 = 6,17 \times 10^{-10} m^4$$

Os parâmetros de entrada para o programa foram: $L_1 = 0,01 m$, $L_2 = 0,88 m$, $P = 12,315 N$, o que significa que a deflexão devida à haste é:

$$A_{1a} = \left(\frac{M_1}{E_1 I_1} - \frac{M_1}{E_1 I_1} * \frac{L_1}{L_2} \right) L_1, A_{1b} = \frac{M_1 * L_1}{2} L_1, \text{ sendo } M_1 = -P(L_2 + L_1)$$

$$\delta_1 = (A_{1a} + A_{1b}) \times \left(\frac{L_1}{2} + L_2 \right),$$

$$\delta_H = -2,3 \text{ mm}$$

Desconta-se esse valor no programa da deflexão corrigida para achar os valores dos módulos efetivos. A seguir apresenta-se a estimativa dos módulos elásticos mediante simulações em ANSYS para os grupos de pás, onde para fazer as simulações é preciso considerar também o valor defletido da haste nos valores das deflexões corrigidas, 12,6mm e 10,7 mm para PCs e PVs respectivamente.

4.3.3 Estimativa do módulo elástico mediante simulações em ANSYS, método 2

Usa-se o mesmo modelo geométrico (GT) nas simulações, mas acrescentam-se as propriedades dos materiais e adiciona-se um arredondamento do bordo de fuga, como foi explicado na metodologia. Nas simulações usaram-se os valores das deflexões corrigidas, tendo descontado a deflexão da haste de alumínio.

Valores e propriedades impostas em ANSYS 14.5 para as duas simulações feitas:

Os seguintes valores e propriedades impostas em ANSYS 14.5 para as duas simulações feitas:

- Relevância 35
- Size function: curvatura e proximidade
- Geometria: casca (com arredondamento de 1mm no bordo de fuga)
- Espessura da casca: 1,12mm para PV e 0,5mm para PC.

Duração da simulação: duas horas, aproximadamente, usando um PC com 8 GB de Ram, com processador tipo i3 de 1,8 GHz.

No caso das PCs obteve-se como resultado que o módulo que fazia defletir 12,6 mm foi $3,05 \times 10^{10} \text{ Pa}$; na Figura 4.18 pode-se ver o valor da deflexão final enquanto que na Figura 4.19 pode-se observar a qualidade da malha, e como o histograma mostra os elementos em sua maior parte, está com qualidade superior a 60 (o 80% dos elementos), sendo que a partir

de 60 considera-se boa, o que quer dizer que tem-se poucos elementos com qualidade ruim.

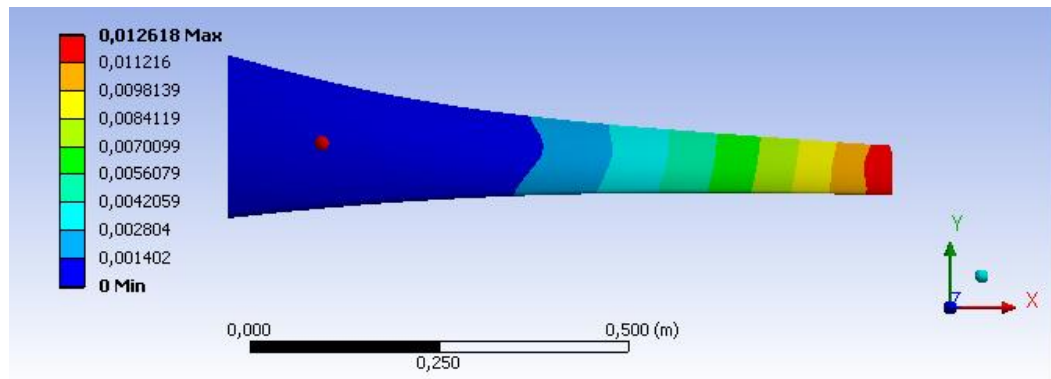


Figura 4.18- Desenho da simulação para a deflexão da PC para uma carga de 12,315N

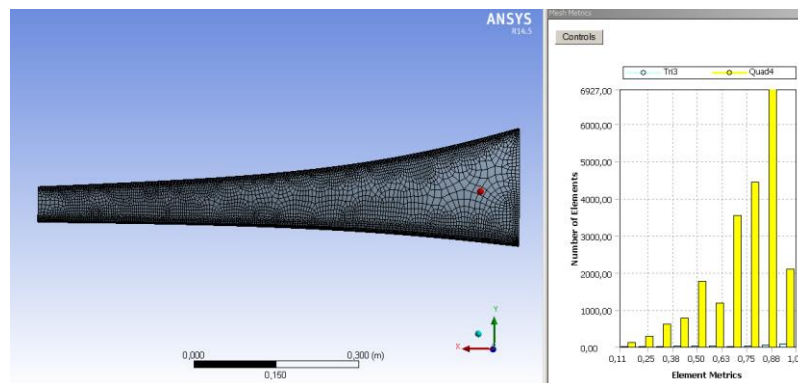


Figura 4.19- Desenho da simulação para a deflexão da PC para uma carga de 12,315N

Agora, no caso da PVs, obteve-se como resultado que o módulo que fazia defletir 10,6 mm foi **$1,44 \times 10^{10}$ Pa**; na Figura 4.20 pode-se observar o valor da deflexão final. Na Figura 4.21 pode-se ver a qualidade da malha, e da mesma maneira que na PC, o histograma mostra que os elementos em sua maior parte têm uma qualidade acima dos 60 (o 75% dos elementos), o que significa que poucos elementos têm uma qualidade inferior, ainda que estejam em maior número dos que encontrou-se para a PC.

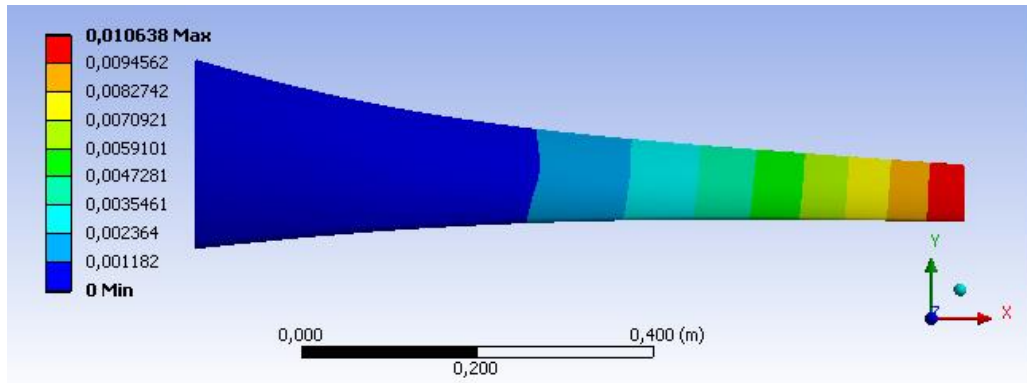


Figura 4.20- Desenho da simulação da deflexão da PV para uma carga de 12,315N.

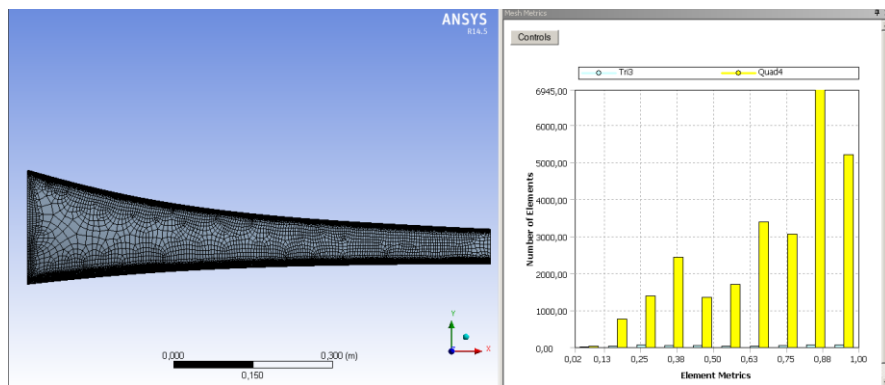


Figura 4.21- Desenho da simulação para a deflexão da PV para uma carga de 12,315N.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Aspectos Gerais

As pás num aerogerador são a componente constitutiva mais importante do mesmo, devido a que são elas as encarregadas de transformar a energia eólica em energia rotacional utilizável, a qual é sua vez transferida ao gerador para fazer a conversão em energia elétrica. A eficiência de conversão de energia das pás depende principalmente da geometria e da rugosidade e peso.

Nesta pesquisa fez-se uma avaliação da uniformidade na rugosidade e geometria de seis pás eólicas, tendo-se que as pás fabricadas com reforço de carbono (PCs), quando comparadas às pás com reforço em fibra de vidro-E (PVs), tiveram melhores características, tais como: (i) uma menor, além de mais uniforme, rugosidade; (ii) uma geometria mais próxima ao modelo geométrico (GT); (iii) assim como um módulo de elasticidade efetivo em flexão superior. Além do tipo de material utilizado, observou-se que o processo de fabricação é um fator que também interfere, tanto na uniformidade da rugosidade como na geometria das pás.

As PCs ao ter melhores características de rugosidade terão uma melhor eficiência na conversão do vento em energia rotacional, por que as camadas de ar ficaram mais próximas à secção transversal das pás dando maior torque que nas pás PVs. Enquanto a geometria a melhora estará em que os torques das pás de PCs serão mais bem dirigidos ao plano do rotor e de magnitude mais próximos, o que fará que o torque resultante fora do plano esteja mais próximo à zero do que nas PVs. Fazendo que a base do rotor seja menos exigida, assim como das próprias pás, além do ganho em eficiência pelo fato das pás terem a geometria otimizada.

Do estudo feito nesta pesquisa, pode-se concluir que as seis pás tiveram discordâncias entre elas, para todas as propriedades avaliadas. As causas mais prováveis dessas diferenças podem ter sido pelo fato da fabricação ter sido manual em todos os casos, ou seja, erros devido ao processo adotado e ao operário. Isto fica evidente pelos valores dispares obtido para todos os descritores avaliados nesta dissertação.

Para o caso da rugosidade, em particular para as pás PVs, apresentaram-se grandes variações nos parâmetros de rugosidade, por exemplo, em Ra para PV2 tem-se valores desde 0,71 μm

até 15,41 μm (com valor médio de 2,61 μm), devido ao tipo de tecido adotado (trama 1x1, a mais simples e com mais pontos de cruzamento entre as fibras da trama e da urdidura), e do fato do acabamento final que não foi tão bem sucedido. Essas pás têm pequenos orifícios na superfície, indicativo de um mal lixamento antes da pintura final. Enquanto que as PCs apresentaram uma rugosidade menor e mais uniforme, por exemplo, no caso da PC1, de até 8,2 μm (com valor médio de 0,43 μm), devido o tipo de tecido usado (HS, trama 8x1, com bem menos pontos de cruzamento), provavelmente, foi de mais fácil manuseio para o acabamento como é indicado nos resultados mais homogêneos.

Adicionalmente, pode-se notar que a operação de manufatura manual deixa uma marca característica nas pás, como visto nas regiões centrais das pás e nas extremidades livres, onde se obtiveram menores valores dos parâmetros da rugosidade, podendo-se isso se deve a um maior agarramento no lixamento destes setores das pás.

No que concerne aos módulos elásticos experimentais, eles não são uniformes, tendo-se uma maior discrepância nas PCs ao comparar-se com as PVs, como é observável a partir dos coeficientes angulares dos diagramas carga versus deflexão para as pás A geometria externa das pás é praticamente idêntica, bem como a fixação externa e as cargas aplicadas, e, de acordo com os cálculos envolvendo os referidos coeficientes, o desvio padrão para as PCs [789,51 N/mm; 947,65 N/mm; 795,45 N/mm] é de 73,19 N/mm, enquanto para PVs [886,75 N/mm; 928,55 N/mm; 974,79 N/mm] é de 35,96 N/mm.

O comportamento anterior é reforçado pelo fato que as geometrias das pás apresentam maior variabilidade para as PCs, quando comparadas às PVs, como os evidenciam os desvios padrões dos afastamentos para o eixo central do GT, [2,12⁰; 2,54⁰; 2,04⁰] 0,22⁰ e [2,6⁰; 2,45⁰; 2,38⁰] 0,09⁰ para PVs e PCs, respectivamente.

5.2 Aspectos Pontuais

A seguir, apresentam-se as conclusões de maneira mais específica:

1. Determinou-se que a população de dados para os parâmetros medidos da rugosidade (Ra, Rq e Rz) não pertencem a uma população gaussiana. O qual faz mérito para um estudo estatístico não gaussiano mais aprofundado que o apresentado

nesta dissertação para encontrar alguma relação matemática que descreva esse comportamento.

2. Observou-se que os parâmetros R_a e R_q tem um comportamento similar, enquanto R_z está muito influenciado pelos defeitos. No caso das PCs, a semelhança nos valores e no comportamento dos parâmetros é maior do que nas PVs. Ainda que, no caso das PVs, observou-se uma maior uniformidade nos valores dos parâmetros entre as pás que entre as PCs, como se pode concluir tendo em conta os dados do Apêndice 1.

3. Elaborou-se um método para comparar as pás com o modelo teórico CAD por meio do programa *Rhinoceros 5.0* conseguindo, assim, encontrar desvios nos eixos centrais e observar como a superfície do modelo se afasta do modelo GT.

4. As PCs têm uma geometria mais próxima ao do modelo teórico, caso a caso, ao se comparar com as PVs. Estas têm um menor desvio dos pontos medidos ao seu próprio modelo, como também um menor desvio do eixo central e da distância média dos pontos com respeito ao modelo GT. Ainda assim, os valores entre pás do mesmo grupo foram mais próximos entre as PVs que entre as PCs, indicando que as PVs são mais uniformes em geometria do que as PCs.

5. Acharam-se as deflexões para as pás, experimentalmente, para diferentes cargas, apresentando um comportamento linear nas relações entre as cargas nas extremidades e as deflexões máximas. Quando comparadas as pás, o grupo de PVs defletiu 11,9% a menos do que as PCs (em média), ainda que a espessura do tecido de reforço nas PVs é de 2,2 vezes maior, aproximadamente.

6. Foram idealizados dois métodos para se estimar um valor médio do módulo de elasticidade para cada grupo de pás, um experimental e o outro baseado em simulações numéricas, obtendo-se resultados razoáveis aos da literatura, para os compósitos com que foram fabricadas as pás.

7. Estimaram-se os módulos de elasticidade das pás por esses métodos, tendo-se grandes diferenças nos valores encontrados, em simulações para PVs **14,4 GPa**; e para PCs **30,5 GPa**, enquanto por aproximações para PVs **13,7 GPa** e para PCs **22,2 GPa**, mas com a mesma ordem de magnitude. Considerou-se que os valores dados pelas simulações são os mais razoáveis, enquanto que os que foram achados por meio da simplificação da geometria são, apenas, um referencial aproximado do valor e um possível método rápido para a estimativa dos valores de módulos elásticos para pás.

Ainda em relação ao mencionado anteriormente, as pás tiveram, em geral, boas propriedades de geometria e do módulo elástico, se comparadas com o referente ao teórico esperado.

5.2 Sugestões e trabalhos futuros

Para complementar esta avaliação para pás será relevante completar o estudo com testes de eficiência na conversão de energia, assim como fazer um estudo aprimorado da dependência entre rugosidade das pás e a geração de energia elétrica.

Com respeito ao módulo de elasticidade seria interessante a avaliação dos módulos de elasticidade encontrados por testes dinâmicos ao invés de flexão.

REFERÊNCIAS

Abdelli, A., 2007, Optimisation Multicritère d'une Chaîne Éolienne Passive, thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de Toulouse, Toulouse, France.

ABNT NBR ISO 4287, 2002, Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: método do perfil – Termos, definições e parâmetros de rugosidade.

Albertazzi G., A.; Sousa, A.R. de., 2008, Fundamentos de Metrologia Científica e industrial.

Amaral E., A.F., 2011, Energia Eólica, Manole, Barueri, SP.

Attaf, B., 2010, Eco-conception et développement des pales d'éoliennes en matériaux composites, Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza, 37-48, Région PACA, France.

Baird, D.C., 1991, Experimentación: Una Introducción a la teoría de Mediciones, y al Diseño de Experimentos, Prentice-Hall. Tradução de: Experimentation: an Introduction to Measurement Theory and Experiment Design.

Behar G., R.; Grima C., P., 2010, 55 Respostas a dudas típicas de estadística, Diaz de Santos 2da edición.

Bernat, J.O., 2011, Energia Verda Disponible en els Pics de Demanda Elèctrica, Titulació especialitat Electricitat, Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica, Universitat Rovira i Virgili, Catalunya, Espanya.

Box, George E.P., William G. Hunter e J. Stuart Hunter., 1978, Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building. Nova York: John Wiley and Sons.

Callister, W.D., 2007, Materials science and engineering : an introduction , John Wiley & Sons, Inc. 7th ed.

Fish, J.; Belytschko, T., 2009, Um Primeiro Curso em Elementos Finitos, LTC. Tradução de: A first course in finite elements.

Institut Universitaire de Technologie de Mulhouse, Département Génie Mécanique et Productique - 2ème Année., Metrologie Tridimensionnelle, 1ère Partie – Sommaire (In French).

ISO TAG 4WG-3, 2008).

Kowarschik, R.; Kühmstedt, P.; Schreiber, W. 3-Coordinate Measurement with Structured Light, Fringe 93, 2nd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, p. 204 – 208, Bremen, Alemanha, 1993.

Levy Neto, F.; Pardini, L. C. Compósitos Estruturais. Ciência e Tecnologia. Ed. Edgard Blücher, 2006.

Marco, F.F. de.; Stockler, C. F.J., 1996 Apostila De Metrologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

Mitutoyo America Corporation. Treinamento Interativo sobre Instrumentos para Metrologia Dimensional. Mitutoyo e Instituto Tecnológico – ITUC da PUC-RJ.

Norma NBR ISO 4287/2002, Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.

Ordoñez M., M.E., 2012, Aplicação Da Fusão de Dados na Medição de Superfícies Regulares e Forma Livre, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mécânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

Osorio, J.D, Prieto, F. A., Osorio, G.A., 2004, “Revisión sobre modelado de superficies complejas”, Dyna, 142, 69-76.

Pinheiro de A., A.T.; Martins da S., M., 2011, Desenvolvimento e Montagem dum Aerogerador Eólico com Pás Compósitas, Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mécânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

Pfeifer, T.; Torres, F., 1999, Manual de Gestión e Ingeniería a Calidad, Mira Editora, Zaragoza, España.

Piratelli-Filho, A.; Tavares F. H., Arencibia V. R., 2012, Application of Virtual Spheres Plate for AACMMs evaluation, Precision Engineering, v 36, pp. 349– 355.

Piratelli-Filho A.; Jobim S. P.; Junior G. W.; Arencibia V. R., 2011, Study of Cad/Cam Processing of Freeform Surfaces, Brazilian Congress of Mechanical Engineering COBEM 2011, Natal, RN, Brazil.

Pires, J. C.; Oliveira, B. F., 2010, Modelagem e Simulação Virtual de Pá para Aerogerador de Pequeno Porte, Design & Tecnologia – 02, Brasil.

May P., F, 2007 Incertezas Na Medição Por Coordenadas Com Ênfase Na Contribuição Da Forma Da Peça E Da Estratégia De Medição, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

Pizo G. A, 2009, Sistema computacional para tratamento de nuvens de pontos e reconstrução tridimensional de superfícies baseadas em modelos deformáveis, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica.

Rhinoceros-Nurbs modeling for Windows-, What is NURBS?., 2012 Available from: <http://www.rhino3d.com/nurbs.htm>.

Selig, M.S.; Guglielmo, J.J.; Broeren, A.P.; Giguère, P., 1995, Summary of Low-Speed Airfoil Data, Vol. 1, SoarTechPublications, Virginia Beach, VA.

C. Sousa, G. de; S. de Oliveira., T. B, 2010, Estudo Aerodinâmico E De Funcionamento De Uma Turbina Eólica No Distrito Federal, Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mécânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

Ugural, A. C. ,2007, Mecânica dos materiais.Gen LTC, 2007.

Van Rooij, R.P.J.O.M.; Timmer, W.A., 2011, Roughness Sensitivity Considerations for Think Rotor Blade Airfoils, Delft University Wind Energy Research Institute Faculty of Civil Engineering and Geosciences Stevinweg, Delft, Holanda.

Zerbizu N., E.J.A., 2008, El Petroleo y la energia em la economia.

A. APÊNDICES

A.1. RUGOSIDADE

A continuação apresentam-se os dados para os parâmetros de rugosidade coletados para as pás PV1, PV3, PC2 e PC3.

Tabela A.1 1: Parâmetros de rugosidade para a pá PV1

PVI Dados por tipo de quadrante	BA			PM			BF		
	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq
1	1,29	6,80	1,47	3,3	15,8	4,3	4,3	19,4	5,28
	4,81	24,4	5,36	1,0	7,00	1,4	1,6	10,8	2,20
	7,89	40,1	9,09	1,3	7,12	1,8	5,8	25,6	1,27
	1,82	9,72	16,4	1,4	8,32	2,1	1,3	8,55	1,41
	3,96	17,8	11,3	1,6	8,43	1,6	2,5	12,7	7,27
	4,74	21,2	5,40	1,2	7,10	1,8	2,9	14,4	1,73
	5,46	19,0	6,11	3,0	11,9	2,0	1,3	7,54	1,50
	1,88	7,77	5,89	2,6	12,5	1,3	1,1	7,52	6,81
2	2,75	11,9	16,5	1,4	7,30	1,9	0,9	6,35	2,13
	13,9	59,3	15,8	1,5	10,5	1,7	1,0	7,62	1,76
	1,43	8,10	2,73	1,5	9,07	5,5	1,2	7,05	1,88
	4,73	18,3	5,32	1,0	7,43	1,7	5,1	29,6	2,32
	3,34	14,5	3,80	6,0	26,5	2,1	1,5	10,1	2,36
	2,98	13,2	3,40	1,2	6,81	1,7	5,4	31,5	1,80
	11,0	43,8	12,4	1,0	6,11	2,4	0,7	5,43	4,06
	3,64	18,4	4,19	0,6	3,61	1,4	0,8	6,18	5,27
3	9,35	44,0	10,7	1,4	7,99	2,0	1,7	8,32	3,19
	1,32	6,67	6,05	1,3	8,64	1,6	1,3	8,40	3,81
	1,51	8,37	4,00	1,7	9,16	7,5	1,7	11,7	2,04
	1,30	6,93	4,11	1,3	7,56	1,5	1,4	8,88	7,32
	1,90	9,41	5,77	0,7	4,16	3,9	8,2	46,5	1,72
	1,14	6,47	2,02	3,5	25,3	3,2	1,8	10,3	1,46
	1,47	6,84	12,6	1,1	6,10	1,0	1,2	6,85	0,73
	1,52	6,96	4,77	1,5	7,90	0,6	1,9	10,2	0,87
4	2,45	15,1	2,87	4,5	22,1	0,9	1,4	9,21	11,6
	3,04	18,5	3,56	1,3	7,66	5,6	1,8	9,40	2,33
	2,02	10,7	3,55	1,8	13,0	1,1	3,0	15,6	2,05
	1,49	8,84	1,73	1,2	6,13	3,5	3,8	24,6	4,48
	3,28	16,0	3,77	0,9	4,95	1,4	1,5	9,26	1,48
	1,37	6,62	1,69	2,4	15,9	1,8	3,1	19,3	2,43
	2,82	20,2	4,46	1,5	7,66	2,1	1,2	7,34	1,55
	1,90	10,0	2,19	1,5	8,08	1,9	3,7	17,2	4,80
Média	3,55	16,7	6,22	1,8	9,94	2,3	2,4	13,5	3,16
Desvio padrão	3,00	12,7	4,38	1,1	5,54	1,5	1,7	9,07	2,37

Tabela A.1 2: Parâmetros de rugosidade para a pá PV3

PV3 Dados por tipo de quadrante	BA			PM			BF		
	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq
1	3,66	18,0	4,21	1,32	8,59	5,18	1,31	8,39	1,64
	4,88	24,0	5,61	4,63	25,4	2,87	1,19	7,27	2,65
	0,94	7,33	1,69	2,27	10,6	2,24	6,05	29,6	1,48
	1,92	12,6	2,27	7,18	30,2	1,57	3,12	20,8	1,58
	8,58	50,8	10,0	3,65	18,7	1,61	2,75	13,7	2,76
	3,37	16,8	3,87	1,20	7,13	3,56	5,84	31,0	7,68
	5,39	22,5	6,12	2,95	12,5	2,28	1,45	7,43	3,53
	1,21	6,86	1,74	0,81	5,02	4,29	1,14	6,78	4,26
2	2,78	16,1	3,64	4,36	23,2	1,75	1,52	9,07	1,94
	1,17	8,07	9,09	2,37	12,8	2,31	2,47	14,1	8,89
	2,16	12,1	10,9	1,36	7,96	4,49	2,35	14,9	2,81
	1,47	8,58	3,41	2,55	19,3	1,43	6,08	34,8	6,38
	1,31	8,91	13,7	0,73	4,40	1,38	5,29	23,7	0,83
	1,09	6,18	1,45	3,37	26,5	1,51	1,92	10,1	0,93
	3,15	16,5	5,69	1,30	7,38	2,95	3,66	22,4	1,45
	2,15	8,76	2,43	2,69	19,2	0,81	6,04	32,0	1,14
3	1,29	7,87	1,43	3,19	16,6	4,06	4,66	19,1	4,60
	1,51	9,55	1,70	1,22	7,63	1,57	1,28	7,72	1,37
	1,42	9,79	4,80	3,56	18,7	1,63	2,03	11,0	1,40
	1,31	7,18	5,52	1,15	7,50	6,28	4,82	23,0	1,26
	2,24	19,5	2,75	1,52	8,32	4,38	1,90	9,95	2,24
	7,00	36,1	8,08	1,92	10,0	1,37	8,20	44,4	5,23
	11,0	39,8	12,4	1,05	6,40	2,63	0,77	5,35	6,64
	1,39	8,18	2,35	1,25	7,67	9,86	0,92	4,95	3,95
4	1,46	9,09	1,69	1,80	12,9	0,87	1,42	8,20	5,41
	1,62	10,9	1,92	1,33	7,53	5,21	1,49	9,09	2,02
	2,49	15,3	2,92	1,74	13,6	2,46	3,25	15,4	4,85
	1,44	8,24	2,01	3,19	19,3	2,38	3,38	20,9	2,70
	1,21	8,13	3,85	1,69	12,5	1,65	3,35	25,2	4,58
	1,61	11,4	2,38	1,72	10,6	4,00	2,57	15,4	7,30
	2,08	8,91	2,54	2,69	19,2	4,00	6,04	32,0	7,30
	3,28	26,5	5,06	0,96	5,90	1,14	2,25	10,1	2,24
Média	2,74	15,0	4,60	2,27	13,2	2,93	3,14	17,1	3,53
Desvio padrão	2,30	10,3	3,33	1,36	6,80	1,88	1,94	10,0	2,26

Tabela A.1 3: Parâmetros de rugosidade para a pá PC2

Pc2 Dados por tipo de quadrante	BA			PM			BF		
	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq
1	0,66	0,93	0,79	0,53	2,25	1,23	0,54	2,23	1,20
	2,57	3,56	3,02	2,02	10,42	5,00	2,08	10,32	4,89
	0,26	0,31	0,27	1,23	5,34	2,73	0,09	1,3	0,25
	2,33	3,66	3,10	0,92	2,22	2,00	0,41	2,06	0,85
	0,26	0,34	0,29	1,50	6,95	3,67	0,42	2,00	0,85
	0,68	1,00	0,85	0,11	0,57	0,26	0,19	0,95	0,35
	2,66	3,86	3,27	0,17	0,53	0,35	0,09	0,51	0,18
	0,11	0,17	0,14	0,11	0,63	0,28	0,15	0,42	0,26
2	0,47	0,84	0,71	0,19	0,88	0,43	0,08	0,53	0,18
	0,28	0,38	0,32	0,60	2,07	1,32	0,14	0,40	0,25
	0,13	0,20	0,17	0,11	0,46	0,25	0,29	1,03	0,62
	0,53	0,75	0,63	0,06	0,35	0,15	0,06	0,37	0,14
	2,66	3,97	3,37	1,78	5,89	3,85	0,12	0,55	0,26
	0,54	0,81	0,68	0,07	0,44	0,18	0,08	0,49	0,18
	2,35	4,38	3,71	0,07	0,40	0,18	0,59	2,52	1,26
	0,27	0,42	0,35	0,07	0,74	0,18	0,08	0,51	0,20
3	0,40	0,62	0,53	0,90	3,48	2,03	0,17	0,80	0,32
	0,10	0,15	0,13	0,17	0,85	0,42	0,13	0,57	0,26
	0,24	0,37	0,31	0,15	0,68	0,34	0,28	0,93	0,53
	0,06	0,10	0,08	0,08	0,46	0,2	0,15	0,64	0,29
	0,13	0,27	0,23	0,41	1,99	0,96	0,15	0,74	0,34
	0,14	0,20	0,17	0,41	2,00	1,00	0,09	0,44	0,18
	1,35	1,95	1,65	0,18	0,94	0,40	0,15	0,60	0,28
	0,21	0,31	0,27	0,09	0,50	0,21	0,21	0,78	0,42
4	0,79	1,24	1,05	0,07	0,45	0,18	0,07	0,34	0,15
	0,45	0,63	0,54	0,29	1,02	0,64	0,42	1,43	0,87
	0,08	0,12	0,10	0,13	0,41	0,28	0,17	0,61	0,34
	0,45	0,57	0,48	0,09	0,35	0,20	0,32	1,57	0,70
	0,08	0,13	0,11	0,06	0,38	0,15	0,15	0,67	0,29
	0,07	0,12	0,10	0,12	0,53	0,29	0,13	0,54	0,26
	0,16	0,24	0,20	0,11	0,54	0,25	1,08	2,64	1,68
	0,11	0,14	0,12	0,57	2,54	1,29	0,07	0,61	0,18
Média	0,67	1,02	0,87	0,42	1,79	0,97	0,29	1,25	0,59
Desvio padrão	0,84	1,30	1,10	0,52	2,28	1,22	0,38	1,75	0,85

Tabela A.1 4- Parâmetros de rugosidade para a pá PC3

Pc3Dados por tipo de quadrante	BA			PM			BF		
	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq
1	0,25	1,26	0,64	0,22	1,31	0,62	0,23	1,28	0,60
	0,28	0,81	0,64	0,19	0,73	0,46	0,19	0,72	0,45
	0,15	1,03	0,37	0,27	1,39	0,68	1,14	4,43	2,37
	0,25	1,07	0,62	0,14	0,59	0,34	0,84	2,09	1,79
	1,16	4,89	2,93	0,14	0,56	0,34	1,19	4,94	2,40
	0,08	0,48	0,18	0,52	1,93	1,28	0,21	1,01	0,51
	0,29	0,88	0,68	0,82	2,70	1,89	0,56	2,60	1,51
	0,20	1,07	0,46	0,21	0,96	0,57	0,31	1,41	0,76
2	1,40	5,77	3,87	0,35	0,99	0,82	0,58	2,74	1,48
	0,31	1,41	0,75	0,36	1,3	0,92	0,11	0,48	0,26
	2,24	8,03	4,64	0,11	0,58	0,31	0,06	0,36	0,15
	0,30	1,37	0,70	0,29	1,09	0,71	0,17	0,66	0,35
	2,09	6,97	4,71	0,24	1,27	0,60	0,08	0,44	0,20
	0,74	2,83	1,64	0,08	0,41	0,21	0,25	0,81	0,53
	0,34	1,72	0,93	0,17	0,52	0,27	0,09	0,47	0,21
	0,63	2,27	1,54	0,19	1,02	0,44	0,13	0,45	0,29
3	0,49	2,18	1,07	0,13	0,69	0,32	0,13	0,57	0,28
	0,21	0,48	0,28	0,14	0,54	0,37	1,24	5,17	2,92
	0,08	0,39	0,20	0,25	1,26	0,62	0,24	1,03	0,57
	0,12	0,49	0,29	0,09	1,27	0,28	0,45	3,38	1,17
	0,10	0,44	0,23	0,36	1,83	0,96	0,80	2,06	1,75
	0,13	0,59	0,31	1,62	4,61	2,21	0,07	0,37	0,17
	0,16	1,11	0,40	0,15	0,75	0,40	0,36	1,23	0,87
	0,27	1,11	0,68	0,23	0,91	0,54	0,11	0,54	0,29
4	1,34	5,01	3,34	0,07	0,75	0,21	0,08	0,41	0,18
	0,09	0,52	0,23	1,47	5,51	3,674	0,06	0,33	0,15
	0,10	0,49	0,25	0,10	0,73	0,28	0,10	0,52	0,23
	0,21	1,13	0,50	0,08	0,44	0,21	0,06	0,31	0,15
	0,36	2,00	0,92	0,48	1,79	1,10	0,10	0,48	0,23
	0,47	1,92	1,04	0,09	0,56	0,25	0,13	0,68	0,32
	0,81	3,96	2,10	0,15	0,78	0,39	0,06	0,51	0,18
	0,08	0,42	0,18	0,11	0,91	0,31	0,87	3,16	2,03
Média	0,49	2,00	1,17	0,31	1,27	0,71	0,34	1,43	0,79
Desvio padrão	0,56	1,99	1,28	0,36	1,10	0,70	0,36	1,39	0,78

Das tabelas anteriores, calcularam-se as médias e desvios padrões totais. Esses descritores são apresentados na Tabela A.1.5, a qual se pode inferir que a rugosidade nas PVs é maior

do que nas PCs e que os desvios padrões estão na mesma escala do que as médias em todas as pás.

Tabela A.1 5- Descritores da rugosidade para as pás com 96 dados medidos por parâmetro

		Ra	Rz	Rq
PV1	Média	2,60	13,43	3,92
	σ	2,22	9,96	3,43
PV3	Média	2,72	15,15	3,69
	σ	1,94	9,36	2,66
PC2	Média	0,46	1,36	0,81
	σ	0,63	1,85	1,08
PC3	Média	0,38	1,57	0,89
	σ	0,44	1,57	0,98

A seguir, apresentam-se as médias e seus desvios para grupos de 10 dados coletados (denominados no corpo deste trabalho como “partes das pás”) para PC1 e PV2. Para ter uma melhor visibilidade e maior facilidade para uma possível análise, foi decidido mostrar aqui os descritores média e desvio padrão por cada 10 dados ao em vez de apresentar os dados todos.

Tabela A.1 6- Média e desvios padrões dos parâmetros de rugosidade para PC1

Lado A						Lado B					
Média Ra	σ_{Ra}	Média Rz	σ_{Rz}	Média Rq	σ_{Rq}	Média Ra	σ_{Ra}	Média Rz	σ_{Rz}	Média Rq	σ_{Rq}
0,15	0,06	0,64	0,19	0,18	0,06	0,15	0,12	0,61	0,36	0,18	0,15
0,15	0,13	0,73	0,55	0,19	0,14	0,17	0,08	1,04	1,06	0,23	0,15
0,15	0,07	0,73	0,33	0,20	0,10	0,18	0,18	0,79	0,61	0,22	0,2
0,16	0,09	0,61	0,32	0,19	0,12	0,20	0,10	0,75	0,39	0,24	0,13
0,19	0,21	0,80	0,60	0,23	0,24	0,25	0,14	0,99	0,38	0,31	0,17
0,29	0,33	1,36	1,13	0,39	0,42	0,26	0,21	1,03	0,66	0,31	0,25
0,30	0,23	1,34	0,87	0,39	0,3	0,26	0,19	1,40	0,94	0,35	0,27
0,34	0,37	1,35	1,15	0,40	0,43	0,29	0,29	1,22	1,01	0,36	0,35
0,38	0,48	1,89	2,25	0,5	0,67	0,32	0,36	1,53	1,28	0,4	0,43
0,39	0,42	1,70	1,72	0,46	0,47	0,34	0,38	1,45	1,24	0,45	0,49
0,39	0,64	1,41	2,06	0,46	0,76	0,34	0,16	1,60	1,18	0,43	0,23
0,39	0,46	1,83	1,99	0,53	0,69	0,35	0,28	1,53	1,17	0,44	0,36
0,41	0,33	1,57	1,09	0,50	0,39	0,38	0,69	1,48	2,22	0,46	0,82

0,41	0,59	1,64	2,19	0,52	0,79	0,39	0,50	2,02	2,43	0,53	0,73
0,43	0,48	1,97	2,27	0,57	0,72	0,45	0,59	2,05	2,29	0,60	0,82
0,48	0,47	1,94	1,72	0,55	0,55	0,47	0,60	1,89	2,32	0,62	0,81
0,51	0,69	2,39	3,45	0,71	0,99	0,48	0,48	2,08	1,85	0,63	0,62
0,58	0,45	2,18	1,44	0,70	0,52	0,48	0,33	1,90	1,14	0,60	0,40
0,62	0,96	2,82	3,85	0,74	1,13	0,53	0,48	2,30	1,85	0,70	0,62
0,70	0,80	2,73	2,59	0,84	0,93	0,53	0,70	2,59	3,65	0,70	0,95
0,73	0,89	3,18	3,63	0,94	1,19	0,65	1,00	3,04	4,14	0,81	1,23
0,79	0,69	3,86	3,65	1,10	1,06	0,65	0,63	2,81	2,64	0,82	0,80
0,84	0,99	3,76	4,16	1,07	1,25	0,68	0,97	3,14	4,03	0,85	1,23
0,91	0,96	3,66	3,88	1,16	1,25	1,40	1,10	6,67	5,52	1,88	1,55

Tabela A.1 7- Média e desvios padrões dos parâmetros de rugosidade para PV2

Lado A						Lado B					
Média Ra	σ_{Ra}	Média Rz	σ_{Rz}	Média Rq	σ_{Rq}	Média Ra	σ_{Ra}	Média Rz	σ_{Rz}	Média Rq	σ_{Rq}
1,36	0,27	9,42	1,56	1,77	0,35	1,75	0,85	10,27	4,84	2,25	1,15
1,36	0,22	8,29	1,43	1,68	0,28	1,88	0,69	11,92	5,06	2,43	1,04
1,58	0,72	8,92	3,98	1,97	0,94	1,90	0,82	12,33	7,21	2,55	1,43
1,71	0,91	9,91	4,10	2,14	1,14	1,91	0,50	11,33	2,39	2,41	0,58
1,85	1,13	10,12	4,88	2,31	1,44	1,95	0,56	11,60	3,65	2,49	0,8
2,20	1,06	12,7	5,66	2,81	1,43	1,96	0,42	11,93	2,12	2,47	0,52
2,24	1,43	13,2	6,98	2,86	1,79	1,97	0,28	12,04	2,3	2,46	0,37
2,25	2,99	11,13	12,14	2,81	3,71	2,02	0,8	13,26	5,69	2,62	1,16
2,27	0,77	13,4	3,37	2,92	1,02	2,03	0,85	12,03	6,34	2,59	1,27
2,52	1,65	12,91	5,30	3,23	1,96	2,11	0,83	13,19	6,00	2,76	1,27
2,59	1,12	14,57	5,89	3,22	1,38	2,18	1,13	14,17	8,73	3,05	1,83
2,65	2,30	15,44	10,84	3,49	3,07	2,22	1,00	13,77	6,76	3,00	1,49
2,65	1,98	14,02	8,94	3,30	2,47	2,29	0,74	13,44	4,79	2,94	1,07
2,66	2,12	15,12	11,02	3,37	2,82	2,29	1,14	14,15	5,65	2,89	1,39
2,97	1,59	15,46	7,84	3,72	2,06	2,30	1,20	13,62	6,58	2,93	1,72
3,12	2,18	17,61	9,64	4,01	2,74	2,39	1,18	13,1	5,64	3,04	1,47
3,36	2,63	16,93	10,59	4,31	3,38	2,44	2,26	13,57	9,73	3,15	2,92
3,38	2,78	19,16	16,17	4,35	3,64	2,60	1,42	15,16	8,02	3,31	1,99
3,49	2,24	18,66	11,47	4,45	2,91	2,63	0,88	14,53	4,09	3,33	1,14
3,60	1,87	20,50	9,58	4,77	2,40	2,77	1,74	16,57	10,45	3,74	2,68
4,21	4,14	20,86	18,41	5,63	5,81	2,99	1,08	18,11	6,03	3,97	1,44
4,32	2,38	23,01	12,9	5,6	3,22	3,36	2,55	18,54	12,29	4,57	4,02
4,36	4,81	21,54	20,04	5,43	5,81	3,52	1,64	21,49	10,18	4,71	2,58
5,85	4,01	27,91	15,12	7,27	4,81	4,21	2,47	23,79	14,03	5,54	3,50

A.2. RUGOSIDADE; TRANSFORMAÇÃO DOS DADOS RA, RQ, E RZ

Nesta subseção, apresentam-se os resultados da transformação dos dados e da recuperação dos dados. Com os dados recuperados, fez-se uma comparação com os dados modificados, que idealmente não deveriam apresentar diferenças.

A seguir apresentam-se os resultados de aplicar a transformação dos dados, mostrando as mudanças nos valores das grandezas, para observar a evolução do processo, como exposto na metodologia, começa-se com Ra.

Na Tabela A.2.1 e da Figura A.2.1, observa-se que ao fazer a transformação, os valores de Ra mudam de uma maneira importante, de um modo geral, embora para as medianas tal mudança seja bem menor, que para as médias e os desvios padrões.

O fato é que as médias e medianas ficam próximas nos dados transformados indicando uma mudança na distribuição dos dados. Na Figura A.2.1, observa-se como a distribuição é mais centralizada para as duas pás, além de se observar que entre os histogramas dos dados originais, dados modificados, e dos dados recuperados existe uma semelhança.

Tabela A.2.1- Evolução dos descritores da grandeza Ra para as pás PC1 e PV2.

	Ra para PC1 (μm)			Ra para PV2 (μm)		
	Mediana	Média	Desvio Padrão	Mediana	Média	Desvio Padrão
Dados Originais	0,210	0,434	0,565	1,925	2,636	1,968
Dados Modificados	0,209	0,433	0,565	1,921	2,642	1,978
Dados Transformados	0,223	0,244	0,138	1,590	1,616	0,455
Dados Recuperados	0,251	0,377	0,448	1,727	2,387	2,218

Na tabela acima, pode-se notar, também, uma grande mudança depois da transformação dos valores nos desvios padrões, ou seja, a média diminui o seu valor para ficar próximo

do valor da mediana, implicam que os dados se aproximam a uma população gaussiana, como se vê na Figura A.2.1 nos histogramas dos dados transformados para as pás.

Em se tratando da recuperação dos dados, pode-se ver que o algoritmo consegue seu propósito de uma melhor maneira para a PV2 do que para PC1, tal como o evidencia a Tabela A.2.1 e ao se comparar os histogramas dados originais e dados recuperdos, na Figura A.2.1.

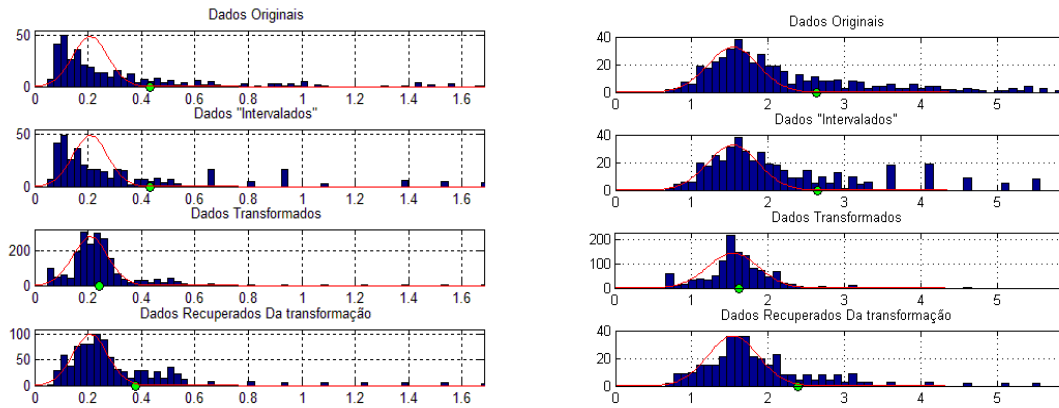


Figura A.2.1- Testes de normalidade para os dados originais das grandezas de rugosidade, acima Ra, Rq e Rz da PC1, em baixo os testes para Ra, Rq e Rz da PV2

Na Tabela A.2.2 e na Figura A.2.2, Observa-se, também, uma aproximação entre os valores da média e a mediana. . Confere-se, ainda, uma distribuição mais centralizada dos dados na transformação e alguma semelhança entre os histogramas com os dados originais, intervalados e recuperados.

Tabela A.2.2- Evolução dos descritores da grandeza Rq para as pás PC1 e PV2

	Rq para PC1 (μm)			Rq para PV2 (μm)		
	Mediana	Média	Desvio Padrão	Mediana	Média	Desvio Padrão
Dados Originais	0,270	0,553	0,737	2,435	3,425	2,675
Dados Modificados	0,272	0,554	0,738	2,424	3,427	2,682
Dados Transformados	0,129	0,163	0,094	2,010	2,005	0,536
Dados Recuperados	0,169	0,259	0,339	2,183	3,053	2,820

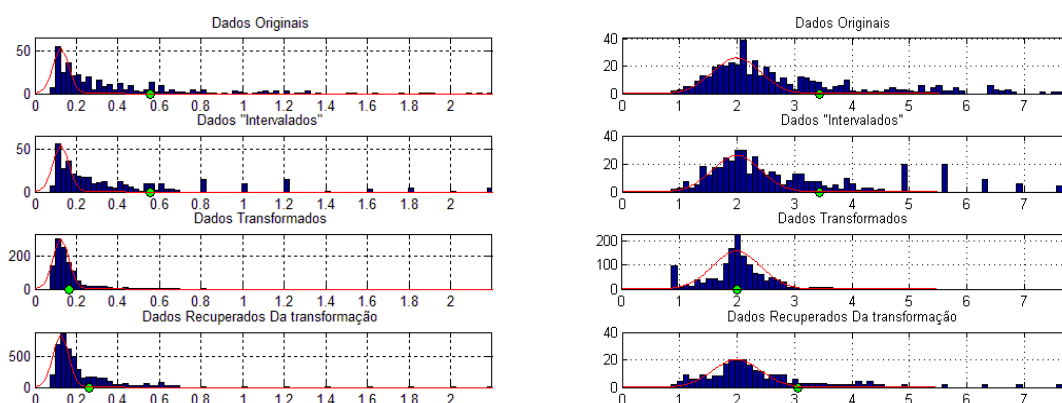


Figura A.2.2 -testes de normalidade para os dados originais das grandezas de rugosidade.

Acima Ra, Rq, e Rz da pá PC1 e abaixo os testes para Ra, Rq e Rz da pá PV2

Finalmente, para a grandeza Rz os resultados são resumidos na Tabela A.2.3 e na Figura A.2.3, sendo que existe também a mesma tendência e comportamento já dito para Ra e Rq, ou seja, os dados tendem a se agruparem uma população central quando são transformados, e tem-se a semelhança entre os histogramas de dados originais, intervalados e recuperados.

Pode-se inferir, da Tabela A.2.3 e da Figura A.2.3, que a transformação apresenta melhores resultados para os dados da PV2 do que para PC1. Os dados recuperados da transformação deveriam ser idênticos aos modificados. Embora isto não seja correto, pode-se inferir que a recuperação dos dados faz com que se tenha uma população de dados com claramente as

mesmas características como se resume na Tabela A.2.4, onde se resume as diferenças em percentagem entre os dados modificados e recuperados para Ra.

Tabela A.2.3- Evolução dos descritores da grandeza Rz para as pás PC1 e PV2

	Rz para PC1 (μm)			Rz para PV2 (μm)		
	Mediana	Média	Desvio Padrão	Mediana	Média	Desvio Padrão
Dados Originais	1,005	1,915	2,415	11,470	14,899	9,437
Dados Modificados	1,006	1,922	2,426	11,465	14,821	9,161
Dados Transformados	0,544	0,605	0,280	9,746	9,849	2,543
Dados Recuperados	0,706	1,280	1,914	10,243	12,416	8,372

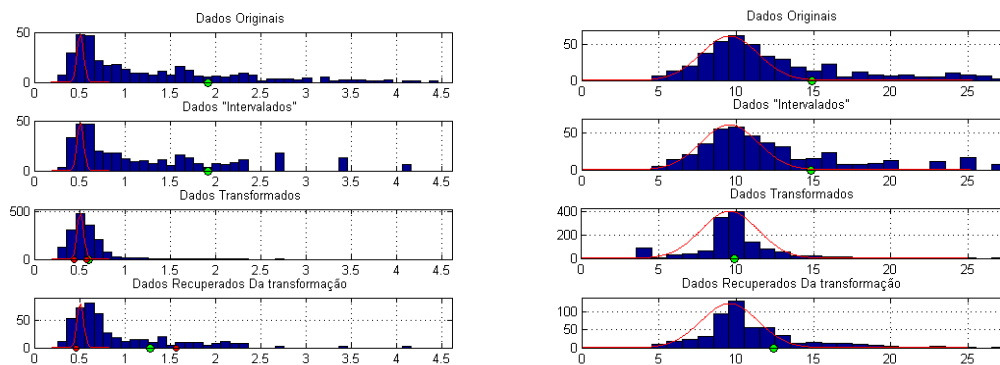


Figura A.2.3- Testes de Normalidade para os Dados Originais das Grandezas de Rugosidade. Acima, Ra, Rq e Rz da PC1, abaixo, os Testes para Ra, Rq e Rz da Pá PV2

Na tabela em baixo, encontram-se valores positivos e negativos. Os positivos indicam um aumento em relação aos valores modificados (dados originais em intervalos desiguais) e os negativos um decréscimo.

Tabela A.2.4- Diferença entre os dados modificados e recuperados

	Diferenças para PC1 (%)			Diferenças para PV2 (%)		
	Mediana	Média	Desvio Padrão	Mediana	Média	Desvio Padrão
Ra	20	-13	21	-10	-10	12
Rq	-37	-53	-54	-10	-11	4
Rz	-30	-33	-21	-11	-16	-9

Na Tabela A.2.5 fica evidente que o algoritmo não é adequado para PC1. No entanto, para PV2, tem-se uma mudança de -16% na média para Rz, ainda alto, mas podem ser considerados aceitáveis, já que, a partir dos dados transformados, pode-se obter um intervalo de confiança. Assim, depois de transformar os dados o processo é parcialmente reversível, como se pode observar dos dados recuperados, os quais se afastam dos dados originais.

A.3. DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE PONTOS PARA A RECONSTRUÇÃO DE SUPERFÍCIE DAS PÁS COMPÓSITAS COM *RHINOCEROS 5.0*

Com o propósito de analisar as diferenças existentes, ao se mudar o número de perfis transversais, na obtenção de um modelo CAD para as pás estudadas, mede-se e reconstrói-se a superfície da pá precursora (PP) usando nove e 17 perfis. Cada perfil foi definido a partir de 20 pontos pegos com uma MMC, 10 pontos por seção lateral, tal como é mostrado na Figura A.4.1. Decidiu-se o valor de nove perfis, já que a pá tem 90 cm aproximadamente de comprimento e, assim, os perfis ficaram distanciados entre eles um pouco mais de 10 cm.

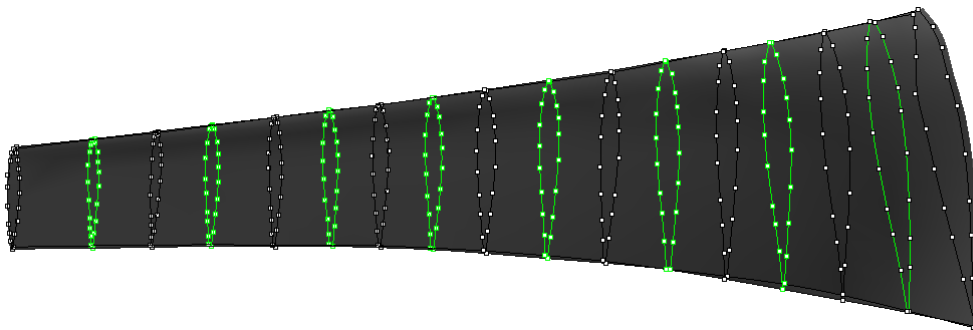


Figura A.4.1- Pá precursora, PP, medida numa MMC tipo braço articulado Arm 100 da Romer

Definiram-se dois modelos a partir desta pá PP, um com nove perfis, denominado GPP, e o outro com 17, denominado GPA. Tendo-se que o modelo GPP tem 180 pontos e que o GPA corresponde a 340 pontos. Como esclarecimento, as pás GP e GPA são modelos da mesma pá física PP, só muda o número de perfis (e os pontos pelo tanto) com que foram feitos os modelos.

Definidos esses modelos, coletaram-se os pontos no laboratório de metrologia dimensional com o braço articulado Arm 100 e com o programa *Rhinoceros 5.0*. fizeram-se as duas reconstruções de superfície, GPP e GPA, para fazer a análise da superfície onde se obtém o desvio padrão e a distância média dos pontos à superfície reconstruída com os pontos medidos.

Mostra-se na Figura A.4.2 e na Figura A.4.3, o modelo da superfície obtido em *Rhinoceros 5.0* para os modelos GP e GPA, respectivamente. Nestas figuras se tem a informação do número de pontos tidos em conta para fazer a análise, da distância média e mediana dos pontos à superfície, além do desvio padrão das distâncias médias dos pontos à superfície. Escolheu-se como distância a “ignorar” 1mm, já que neste valor caem a maioria dos pontos nas duas superfícies das pás avaliadas. O que se levou a cabo para essa escolha foi um ajuste enquanto se ia fazendo a análise das pás.

Assim, para escolher esse valor, procurou-se que, nos dois modelos se obtiveram baixos valores nas médias e nos desvios padrões e que o número de pontos fosse superior a 99%, já que sendo esta pá a PP e a nossa referência para as demais pás.

Na Figura A.4.2, pode-se observar, como no modelo GP, a maior parte dos pontos foi tida em conta, 179 de 180 pontos possíveis para fazer a análise e que desses pontos muitos tiveram cor azul indicando que a superfície modelada se ajusta a quase todos os pontos, a não mais de 0,3mm de distância. Da Figura A.4.3, pode-se fazer um análise semelhante do modelo GPA, tendo 339 pontos tidos em conta dos 340 possíveis, enquanto à superfície se observam pontos mais distantes dela, com cor amarelo e vermelho que, ao se comparar com a Figura A.4.2, pode-se observar alguns pontos mais distantes em GPA que em GP, embora a distância média e o desvio padrão são menores para GPA.



Figura A.4.2- Pá precursora, PP, reconstruída com 180 pontos coletados com uma MMC tipo braço articulado Arm 100 da Romer

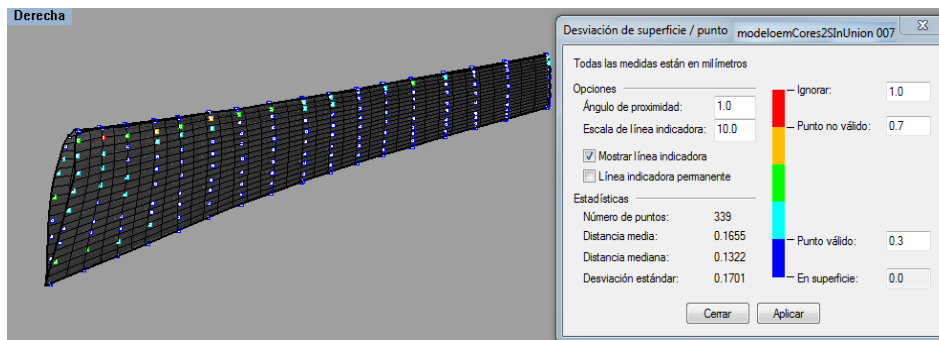


Figura A.4.3- Pá precursora, PP, reconstruída com 340 ponto coletados com uma MMC tipo braço articulado Arm 100 da Romer

Obtendo-se o numero adequado para a reconstrução das pás, deve-se padronizar a metodologia para garantir imparcialidade da mesma. Assim, na seção A.4 destes apêndices, faz-se esse processo tendo em conta os resultados obtidos aqui.

A.4. PADRONIZAR A METODÓLOGIA PARA A ANÁLISE EM RHINOCEROS 5.0

Da seção anterior A.4, obteve-se um número adequado para fazer a reconstrução das pás. Desses resultados, pode-se inferir que o GP apresenta resultados desfavoráveis com respeito aos da pá GPA, 1% e 2,5 % maiores na distância média e no desvio padrão. Com esse resultado, pode-se concluir que coletando a menor quantidade de pontos (180) não se perde muita qualidade com relação a coletar 340. Além de usar menos pontos, o qual é vantajoso, tendo-se em conta que a pesquisa foi desenvolvida com sete pás.

Pelo anterior, decidiu-se trabalhar com 180 pontos e 1 mm como valor limite para se ter em conta os pontos. As sete pás foram medidas com o braço articulado Arm 100 usando a mesma distribuição dos pontos que no modelo GP. Fez-se a análise com *Rhinoceros 5.0*, a qual foi preliminar e foi desenvolvida para achar o número de pontos mais adequado, obtendo-se os seguintes resultados listados na Tabela A.5.1.

Tabela A.4. 1- Resultados obtidos com *Rhinoceros 5.0* para a superfície reconstruída para cada pá com cota de 1mm

	PV1M	PV2M	PV3M	PC1M	PC2M	PC3M
Número de pontos	178	174	176	174	176	178
Distância média (mm)	0,197	0,177	0,171	0,183	0,181	0,166
Desvio padrão (mm)	0,226	0,206	0,199	0,183	0,180	0,207

Como pode-se observar na tabela, obtiveram-se diferenças no número de pontos usados pelo programa para descobrir o desvio padrão dos pontos à superfície. Para fazer uma análise do desvio padrão das pás, é preciso ajustar todos os desvios para o mesmo número de pontos. Isto é aconselhável, já que quanto maior é o número de pontos, o desvio padrão tende a aumentar neste caso em particular (devido a que se teria em conta pontos mais distantes à superfície). Assim, tendo-se desvios padrões obtidos com o mesmo número de pontos, consegue-se as mesmas condições para todos os modelos das pás, o que é equivalente às condições necessárias para uma análise mais adequada.

Neste trabalho, ajustou-se o valor dos pontos usados para o cálculo do desvio padrão com o valor médio do número de pontos da Tabela A.4.1, trabalhando-se com 176 de 180 possíveis. Para fazer isto, foi-se baixando ou subindo a cota dos valores não tidos em conta, “ignorar”. Em caso de baixar a cota de distância “ignorar” e se chegar ao valor da cota de valores de “pontos não válidos”, desceram-se juntas as cotas até se achar o valor que desse o número de 176 pontos.

Os resultados obtidos em *Rhinoceros 5.0*, para a cota de 1mm como valor limite para ter em conta os pontos e para 176 pontos se apresentam combinados na Tabela A.4.2, isto para fazer a comparação mais simples. As setas indicam o aumento ou diminuição dos pontos a ter em conta na análise; a bolinha indica que o número de pontos se matem fixo, pode-se inferir na tabela uma relação direta entre a mudança no número de pontos e as grandezas distância média e desvio padrão. Quando se faz aumentar ou diminuir o número de pontos, as grandezas também aumentam ou diminuem, respetivamente.

Tabela A.4. 2- Resultados obtidos com *Rhinoceros 5.0* para a modelagem da superfície, para as pás com a correção a 176 pontos

	PV1M	PV2M	PV3M	PC1M	PC2M	PC3M	Média
Número de pontos antes	178	174	176	174	176	178	176
Distância média antes (mm)	0,1970	0,1773	0,1711	0,1828	0,1812	0,1660	0,1792
Desvio padrão antes (mm)	0,2259	0,2062	0,1995	0,1828	0,1800	0,2073	0,2000
Número de pontos	176 ↓	176 ↑	176 ●	176 ↑	176 ●	176 ↓	176
Distância media (mm)	0,1881	0,1869	0,1711	0,1931	0,1812	0,1579	0,1797
Desvio Padrão (mm)	0,2108	0,2241	0,1995	0,2061	0,1800	0,1939	0,2024

Na tabela acima, PV e PC indicam o grupo de pás, assim, em cada uma se tem a média do grupo. Para obter as variações nas grandezas (distância media e desvio padrão), ao fixar em 176 o número de pontos a ser tidos em conta na análise, faz-se a média das grandezas antes do ajuste e depois, tendo-se um aumento com respeito à antes da mudança, tal aumento, no caso da distância média, é de 0,3% (de 0,1792mm a 0,1797mm) e no desvio padrão, a diferença é de 1,2% (de 0,2000mm a 0,2024mm).

Quando se observa as variações devidas a mudança no número de pontos sempre são menores que a variação das grandezas entre os dois grupos de pás (pá com reforço em fibra de vidro ou carbono). Assim, por exemplo, a diferença de grandeza entre PV e PC para a distância média antes é de -2,8%.

O sinal negativo nas diferenças entre os dois grupos indica que o valor é menor para PV, o qual acontece para todos os casos como se pode conferir na tabela abaixo.

Tabela A.4. 3- Resultados obtidos com *Rhinoceros 5.0* para a modelagem da superfície, para as pás com a correção a 176 pontos.

	PV	PC	Média	$\% \Delta_{PV-PC}$
Distância média antes (mm)	0,182	0,177	0,179	-2,8
Desvio padrão antes (mm)	0,211	0,190	0,200	-8,6
Distância média (mm)	0,182	0,177	0,180	-2,5
Desvio Padrão (mm)	0,211	0,193	0,202	-9,7
% Mudança das Distâncias Médias	0,1	0,4	0,3	
% Cambio dos Desvios Padrões	0,4	1,7	1,2	

Para os cálculos dispostos na tabela acima, usou-se a seguinte equação de diferença relativa:

$$\% \Delta = \frac{100 * (G_{176} - G_{antes})}{G_{antes}},$$

Sendo G_{176} a grandeza com 176 pontos e G_{antes} a grandeza com o número de pontos antes. Já o cálculo da diferença entre PV e PC, $\% \Delta_{PV-PC}$, usou-se a seguinte equação:

$$\% \Delta = \frac{100 * (PC - PV)}{PV}$$

A título de conclusão, nesta pesquisa, usou-se o método descrito nos apartados 3.5 e 3.6, que estão baseados na análise feita neste apêndice.

A.5. DADOS DAS DEFLEXÕES NAS PÁS USANDO DIFERENTES MASSAS

Os dados coletados para as deflexões foram medidos seguindo o procedimento descrito na metodologia. foram-se colocando massas conhecidas, uma a uma, e medindo as deflexões resultantes. Logo, foram retiradas, uma de cada vez, para medir de novo a deflexão para, assim, obter as Tabelas A.5.1 e A.5.2; e as Figuras A.5.1; A.5.2 e A.5.3 apresentadas abaixo, consecutivamente.

Tabela A.5 8: Deflexões nas PCs.

F(N)	PC1			PC2			PC3		
	Deflexões, $\delta(mm)$								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,528	1,88	1,65	1,75	0,87	1,31	1,12	0,56	1,53	1,43
3,677	5,70	4,02	4,77	3,67	3,55	3,18	3,37	3,97	4,25
5,829	7,50	6,98	7,05	5,25	4,95	5,76	6,41	6,03	7,63
8,000	9,98	9,94	10,23	7,67	7,65	7,64	8,56	8,55	9,71
10,151	13,70	12,50	12,71	9,21	10,23	9,86	13,11	12,27	11,93
12,315	16,40	15,52	15,37	13,41	12,63	12,64	15,35	15,69	15,21
10,151	13,82	12,94	12,73	10,92	10,25	10,18	13,59	12,39	12,71
8,000	11,28	10,86	11,11	8,61	8,25	8,18	9,18	11,85	10,11
5,829	7,86	8,02	7,87	6,65	6,13	5,86	7,67	7,49	7,73
3,677	6,28	4,44	4,85	4,29	3,75	3,52	4,79	5,25	5,63
1,528	3,30	2,12	1,91	2,27	1,63	1,16	2,34	2,61	2,47

Tabela A.5 9: Deflexões nas PVs.

F(N)	PV1			PV2			PV3		
	Deflexões, $\delta(mm)$								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,528	1,51	1,05	1,1	0,71	1,08	0,44	0,17	0,89	0,99
3,677	4,03	2,87	3,18	3,25	4,34	3,84	2,91	2,73	3,11
5,829	6,01	6,19	5,82	6,25	6,68	6,04	4,91	5,45	5,19
8,000	8,31	8,49	8,94	8,67	8,34	7,5	7,61	7,53	8,11
10,151	10,93	10,17	10,58	11,05	10,98	10,06	10,31	9,51	9,91
12,315	14,13	14,07	13,22	13,23	13,72	12,64	12,59	12,07	12,55
10,151	12,27	10,63	11,14	12,05	11,38	10,44	10,97	10,33	10,87
8,000	8,81	9,11	9,44	10,07	9	8,54	8,71	8,65	8,63
5,829	6,15	7,07	6,18	7,11	7,12	6,12	6,89	6,57	6,73
3,677	5,21	5,13	3,8	5,31	4,48	4	4,73	3,93	4,45
1,528	1,99	1,41	1,74	2,81	2,18	1,52	2,13	1,75	2,31

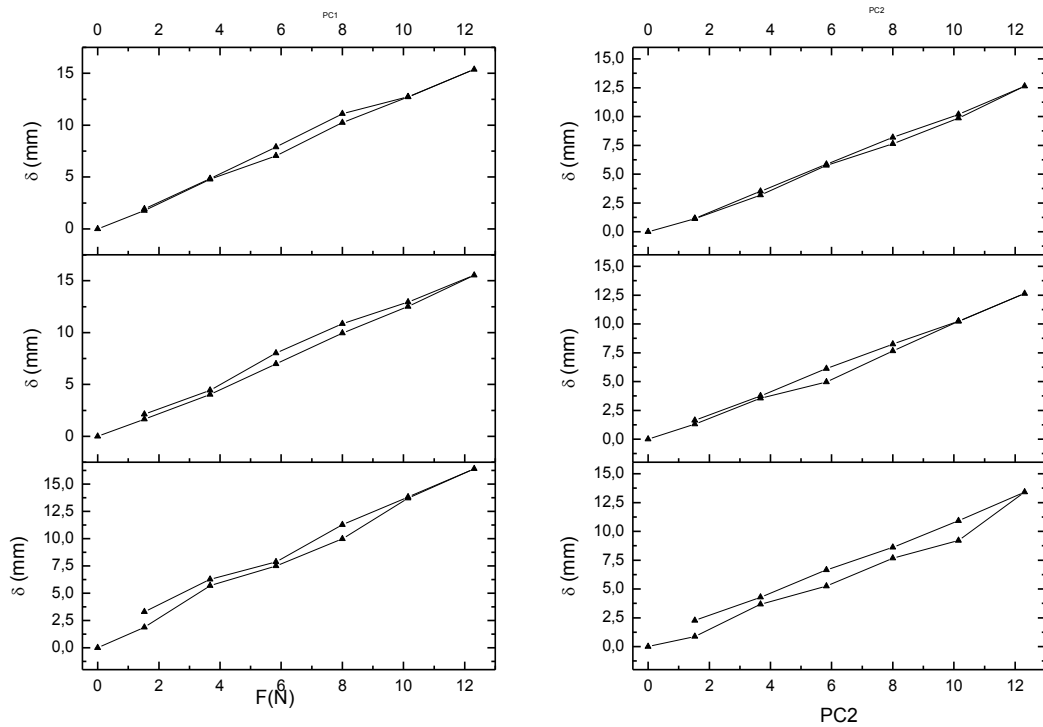


Figura A.5.4: Gráfico dos dados para as deflexões em PC1 (na esquerda) e PC2 (na direita) .

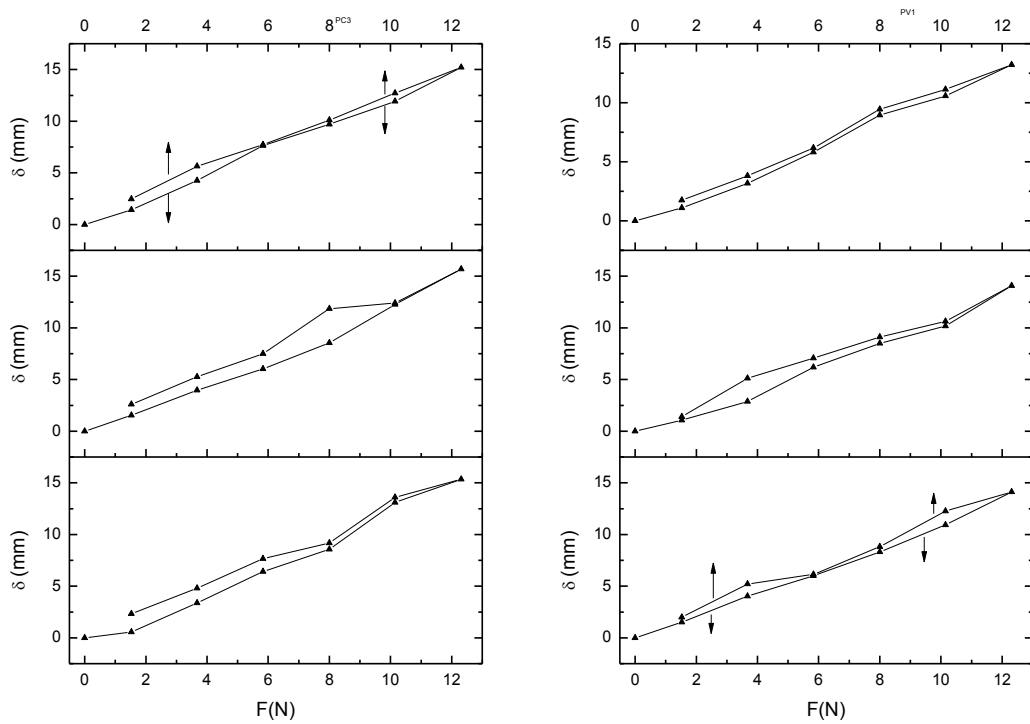


Figura A.5.5: Gráfico dos dados para as deflexões em PC3 (na esquerda) e PV2 (na direita) .

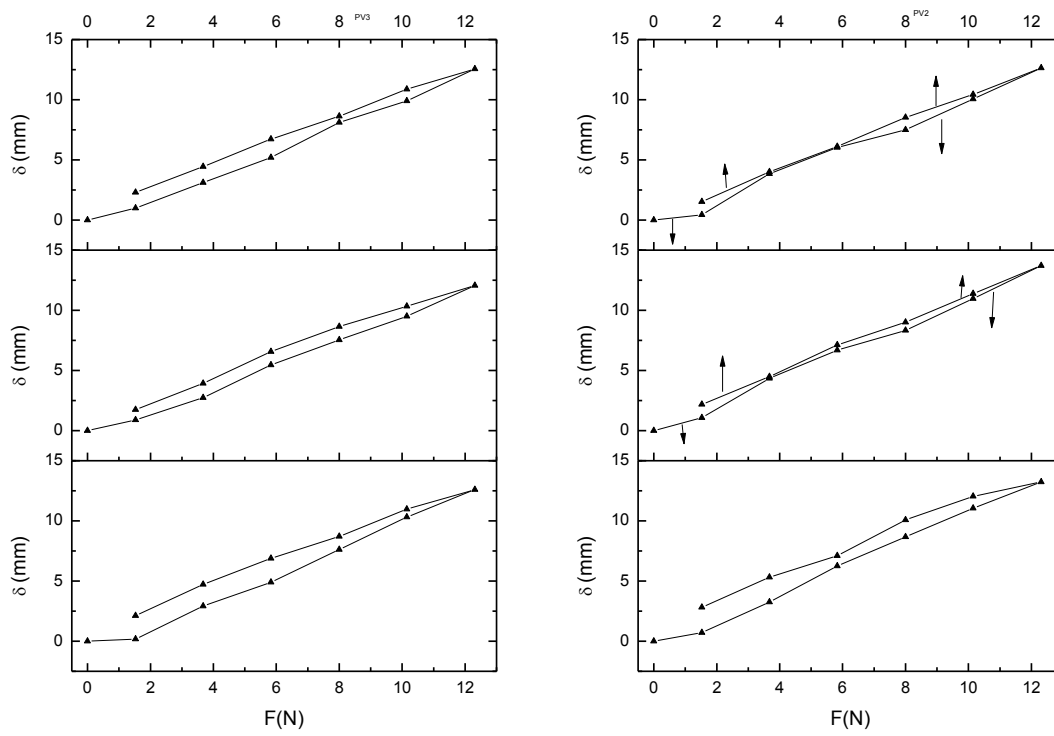


Figura A.5.6 Gráfico dos dados para as deflexões em PV2 (na esquerda) e PV3(na direita)